Arturo Ferrés Arrospide
Rua Major Diogo,39 cj.705 - Bela Vista
CEP 01324-000 – São Paulo – SP – Brasil
Tel.: (55 11) 9 5422 0342 | (55 11) 9 8501 4737
e-mail: edson855@hotmail.com | www.andrart.com.br
Inglês • Francês • Espanhol

Tradutor Público e Intérprete Comercial
Matrícula JUCESP Nº 654
RG Nº 29.621.199-0
CPF Nº 116.347.278-60
CCM Nº 2.940.845-8
INSS Nº 112.299.981-22

DECLARAÇÃO

Foram-me apresentados pelo Professor Leonardo Fuks os livros "The Musician's Guide to Acoustics", de Campbell & Greated, e "A Acústica Musical em Palavras e Sons", de Flo Menezes.

Concomitantemente, foi-me apresentado um documento (anexo), com 26 páginas, contendo excertos de ambos os livros, dispostos em duas colunas, lado a lado, com partes supostamente traduzidas diretamente, conforme declaração do consulente.

Foi-me solicitado que fizesse uma comparação, na condição de tradutor público e intérprete comercial, dos trechos apresentados e atestasse a similaridade entre os textos em inglês e em português, bem como, em caso de similaridade de textos, que atestasse também a qualidade das eventuais traduções. Foi-me também consultado se as eventuais similaridades entre os textos seriam passíveis de verificação por pessoas com nível pelo menos intermediário de conhecimento das línguas inglesa e portuguesa.

Após análise detalhada dos mais de cinquenta trechos comparados e verificados nos respectivos livros originais, verifiquei que grande parte dos trechos em português contidos no documento de 28 páginas são traduções fieis e corretas do seu original em inglês, com adaptações de menor monta e algumas vezes intermeados e/ou acompanhados por textos do autor do livro em português. A qualidade da tradução é boa, com boa compreensão do texto em inglês e a correta elaboração do texto em português sem se ater a uma tradução literal pobre e primária. O nível de proficiência nas línguas inglesa e portuguesa suficiente para a verificação das traduções pode ser considerado intermediário. Via de regra, os textos do livro em português traduzidos do original em inglês não traziam menção de que eram traduções do livro em inglês.

Atesto ainda que a sequência dos tópicos no livro em português segue de forma análoga a sequência do livro em inglês, mantendo grande similaridade à obra original quanto à apresentação dos temas tratados.

Sendo o que tenho a atestar, firmo a presente declaração.

Nada mais. Dou fé.
São Paulo, em 9 de junho de 2024

Documento **assinado digitalmente** e com validade legal, em conformidade com: (1) o padrão ICP-Brasil (Infraestrutura de Chaves Públicas Brasileira) do Instituto Nacional de Tecnologia da Informação (ITI); (2) a Instrução Normativa DREI 72, seção II, artigo 24, de 19 de dezembro de 2019, da Secretaria Especial de Desburocratização, Gestão e Governo Digital do Ministério da Economia do Brasil - sobre emissão de traduções públicas em meio eletrônico; e (3) a Medida Provisória 2.200-2/2001 do Governo Federal do Brasil.

O ouvido externo consiste da *pinna (orelha)* e de um canal quase cilíndrico de aproximadamente 25 mm de comprimento por 7 mm de diâmetro, conhecido como *canal auditivo*. Este canal culmina no *tímpano* ou *membrana timpânica*, a qual consiste numa delicada membrana semitransparente de forma cônica e achatada.

Comportando-se como um tubo cilíndrico, o canal auditivo possui, como todo ressonador (e como bem o provou Helmholtz, Carl Stumpf (1848-1936) e outros), uma tendência de ressonância a uma certa frequência. No caso específico do canal auditivo, a frequência em torno de 3 800 Hz é, em certa medida, privilegiada na captação sonora pelo ouvido, que tende a uma resposta mais acurada por volta desse eixo frequencial.

Quando uma onda sonora chega ao ouvido, parte dela é transmitida pelo canal auditivo e parte dela é refletida para fora de nosso ouvido. As flutuações de pressão resultantes que são "admitidas" pelo ouvido forçam o tímpano a vibrar. A orelha funciona, assim, como uma espécie de funil ou *filtro*, coletando a energia sonora que chega ao ouvido a partir de sua área e canalizando essa energia para uma área bem menor, qual seja: a do canal auditivo propriamente dito. Uma simples experiência nos demonstra a importância da área (dimensão) da orelha: se pusermos uma de nossas mãos atrás de uma orelha, haverá um considerável aumento da área responsável pela "coleta" de som, o que enfatizará o efeito causado pela orelha na captação dos sons: os sons são imediatamente percebidos com maior intensidade.

A orelha também desempenha importante papel na habilidade do ouvinte em identificar a direção da qual chega uma determinada onda sonora. Além da direção da proveniência sonora, o ouvido procura estimar a distância da fonte sonora, sendo que, quanto mais agudo for o som, maior será a dificuldade da audição na estimação da distância. Com relação à direção do som especificamente, a propriedade da escuta – que pode ser descrita como *escuta direcional*, por implicar a percepção da *direcionalidade* das ondas sonoras – decorre do fato de que as ondas refletidas no canal auditivo a partir da captação oriunda de diferentes regiões ou partes da orelha viajarão distâncias distintas. O cérebro será então capaz de analisar tais diferenças de tempo, correspondentes à direção através da qual a onda sonora incidiu na orelha.

Quando a fonte sonora não se situa diante do ouvinte (ou diretamente atrás dele), ambos os ouvidos captarão sinais distintos, pois as ondas sonoras resultantes atingirão uma orelha antes que a outra, mesmo que tal diferença seja ínfima e aparentemente sem importância. A tal diferença de tempo na captação de um mesmo som pelas duas orelhas dá-se o nome de *disparidade binaural*, disparidade esta que fornece os indícios mais determinantes para que o cérebro reconheça a posição da fonte sonora no plano horizontal.

THE OUTER EAR

The outer ear consists of the *pinna* – the external flap – and an almost cylindrical channel roughly 25 mm long and 7 mm in diameter, known as

the *ear canal* (*auditory meatus*). This channel is sealed at the inner end by the *eardrum* (*tympanic membrane*), which is a thin semitransparent membrane with the shape of a flattened cone. When a sound wave arrives at the outer ear, part of the wave is transmitted down the ear canal; the resulting pressure fluctuations force the eardrum into vibration. Behaving like a cylindrical tube closed at one end, the ear canal resonates at about 3800 Hz (see p.197), boosting the ear's response in this frequency range.

The elaborate shaping of the pinna suggests that it has some particular function to perform. It certainly acts as a funnel, collecting the sound energy arriving over a fairly large area and channelling it into the smaller area of the ear canal. Cupping a hand behind the ear increases the collecting area, and emphasises this effect.

The pinna also plays a role in the ability of a listener to identify the direction from which a sound has come.

It has been suggested (Batteau 1967) that this effect is partly due to the fact that waves reflected into the ear canal from different sections of the pinna will have travelled different distances. The brain may be able to analyse the corresponding time delays, which will vary with the direction of incidence of the wave (see Fig. 2.4).

If the sound source is not directly in front of the listener (or directly behind), the two ears will pick up different signals. This binaural disparity provides the dominant clues from which the brain recognises the position of the sound source in the horizontal plane (Jeffress 1975).

Por que isso acontece?

Quando uma certa fonte sonora (F) se aproxima do ouvinte (trajeto de B a A do exemplo 33), a distância entre os picos de pressão (responsáveis pelo comprimento de onda) é reduzida pela distância percorrida pela fonte durante o ciclo entre os picos. A onda parece para esse ouvinte, então, como que "comprimida". Ainda que a onda em si mesma não seja afetada pelo movimento da fonte, tal redução no comprimento da onda corresponde, no ouvido, a um aumento de sua frequência. O ouvido, na realidade, "compensa" o encurtamento do comprimento de onda alterando a frequência do som para o agudo. O contrário ocorre quando a fonte sonora se distancia: a onda se "estende" do ponto de vista do receptor que continua parado, o comprimento de onda aumenta para o receptor e seu ouvido "compensa" este aumento com um decréscimo da frequência percebida.

O mesmo fenômeno também se dá quando a fonte sonora permanece no mesmo local e o ouvinte se locomove. É fácil deduzirmos o porquê disso: quando o ouvinte se distancia de uma fonte sonora estacionária, as mais recentes ondas sonoras emitidas por essa fonte necessitam percorrer um maior caminho até atingirem o ouvinte que parte, gerando nele a percepção de uma frequência mais grave.

effect, known as the *Doppler effect*, is illustrated in Fig. 1.33. When a source of sound is approaching the listener, the distance between pressure peaks (the wavelength) is reduced by the distance travelled by the source during the cycle between the peaks. The wave appears 'squashed up'. Since the speed of the wave is unaffected by the motion of the source, the reduction in wavelength must correspond to an increase in frequency: the

pitch is raised. The reverse happens as the source recedes. The wave is 'stretched out'; the wavelength increases and the frequency and pitch drop.

Principalmente no que se refere a sons de baixa frequência, que sofrem facilmente difração, a disparidade binaural constitui o indício mais significativo para a *localização* do som. Uma onda sonora cuja fonte se situe à esquerda chegará primeiramente ao ouvido esquerdo. Se seu comprimento de onda for suficientemente longo, parte da onda será difratada por volta da cabeça, atingindo a orelha direita, em média, cerca de 0,7 ms mais tarde. Se o período da onda sonora for maior que isto (ou seja, se a frequência se situar abaixo de 1 500 Hz), a diferença de tempo causará uma diferença de fase de menos de um ciclo entre os sinais nos dois ouvidos, e o cérebro reconhecerá tal diferença como o indício de que o som provém da esquerda.

É possível que a disparidade binaural não constitua o único instrumento do qual se serve o mecanismo da audição para a localização dos sons, somando-se provavelmente a outros relevantes indícios – tais como os baseados em pequenas diferenças de intensidade nos sinais captados por ambas as orelhas etc. –, mas certamente reside no principal recurso de que dispõe o cérebro para a construção de uma imagem sonora espacial (CD 24).

2.2. O Ouvido Médio

A parte exterior do ouvido médio é formada quase que exclusivamente pelo tímpano. Opostas ao tímpano, existem duas pequenas aberturas no esqueleto, as quais separam o ouvido médio do interno, conhecidas como *janela oval* (*fenestra ovalis*) e *janela redonda* (*fenestra rotunda*).

Entre o tímpano e a janela oval, existe um elo de ligação, como uma espécie de "sistema de alavanca", constituído por três pequenos ossículos, conhecidos mais comumente como *martelo* (*malleus*), *bigorna* (*incus*) e *estribo* (*stapes*), sendo que este último, apesar de seu nome sugestivo, não possui mais que 3 mm de altura.

Exemplo 36

Estrutura do ouvido médio

martelo — bigorna — janela oval — tímpano — estribo — fluido coclear

[Cf. Campbell & Greated, "2. Hearing Musical Sounds", p. 44.] © OUP

For low frequency sounds, the most significant clue is the time delay between the arrivals of a sound wave at the right and left ears of the listener. A wave approaching from the left will arrive first at the left pinna. If the wavelength is long enough, part of it will be diffracted round the head, arriving at the right pinna about 0.7 ms later. If the period of the sound wave is greater than this (that is, if its frequency is below about 1500 Hz), the delay will cause a phase difference of less than one cycle between the signals in the two ears; the brain recognises in this difference a clue that the sound came from the left.

. Using these clues, along with others based on small intensity differences, the brain constructs a spatially separated sound image: the listener can 'see' the positioning of the instruments with his ears, even when his eyes are shut.

THE MIDDLE EAR

Between the outer ear and the inner ear is a small air-filled cavity in the bone of the skull: this is the middle ear. Its outer boundary is formed almost entirely by the eardrum. On the other side of the cavity there are two small apertures in the bony wall dividing middle and inner ears: these are known (because of their shape) as the *oval window* (*fenestra ovalis*) and the *round window* (*fenestra rotunda*).

Providing a link across the middle ear from eardrum to oval window is a lever system consisting of three small bones. These are known collectively as the *ossicles*, and are given the graphic (if somewhat imaginative) titles of the *hammer* (*malleus*), the *anvil* (*incus*) and the *stirrup* (*stapes*). We should not allow this cavalier use of the blacksmith's vocabulary to distort our sense of scale: the stirrup in the middle ear is only 3 mm high.

O ouvido médio dá vazão à parte traseira da garganta através da *trompa de Eustáquio*. É pelas vias da *trompa de Eustáquio* que se tem a única maneira de o ar poder entrar na estrutura fisiológica do ouvido médio ou sair dela. É igualmente através desse canal que o corpo procura "equalizar" a variação de pressão no ouvido médio quando de uma variação muito acentuada de altitude, responsável pela incômoda sensação de pressão no ouvido que temos, por exemplo, ao descer a serra de automóvel ou durante uma decolagem de avião.

O ouvido médio faz a ponte entre a captação externa do som pelo ouvido externo e o processamento cerebral dos dados sonoros tais como estes são comunicados ao cérebro pelo ouvido interno. A principal função do mecanismo do ouvido médio é, pois, a de transmitir as vibrações sonoras para a janela oval na entrada do ouvido interno.

Como isso ocorre?

Em resposta às vibrações do tímpano, o martelo e a bigorna oscilam em sua junção, fazendo que o estribo se mova para dentro e para fora da janela oval, como uma espécie de pistão (cf. o Exemplo 36). Se um som chegasse diretamente à entrada do ouvido interno, menos de 1% de sua energia passaria pelo orifício da janela oval para dentro do ouvido interno. O restante seria refletido de volta para fora do ouvido, devido às ínfimas dimensões dessa "portinha de entrada". É graças à intervenção do mecanismo de transmissão do ouvido médio que cerca de 50% da energia sonora consegue ser transmitida ao ouvido interno naquele âmbito de frequência de maior importância para a prática musical mais tradicional (relativa à tessitura orquestral).

2.2.1. Impedância

A quantidade de som que passa por um determinado obstáculo pode ser medida observando-se o movimento exercido por esse obstáculo quando uma onda sonora com certa pressão incide sobre o mesmo. Tal medida é denominada *impedância*.

Se a amplitude dessa pressão é P, e o obstáculo vibra com uma velocidade máxima V, sua específica impedância acústica z será definida pela equação de P e V:

$$z = P / V$$

Um obstáculo bem rígido (como uma peça de madeira, concreto ou vidro) vibra muito pouco em resposta à pressão exercida por um som. Sua específica impedância acústica é, pois, muito alta. Já no caso de uma membrana, que se flexiona facilmente (como a membrana dos tom-tons e dos

The only way in which air can enter or leave the middle ear is through the eustachian tube, which connects it to the back of the throat. This passage serves to prevent a steady pressure difference building up between the middle ear and outside atmosphere. The sensation of discomfort or even pain resulting from a pressure difference across the eardrum is often experienced when descending in an aircraft, or driving rapidly downhill in a car.

the membrane vibrating. The principal function of the middle ear mechanism is to transfer these vibrations to the oval window at the entrance to the inner ear.

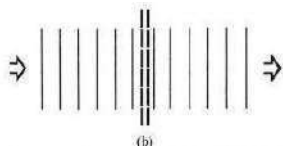
. Recent observations (Rhode 1978) suggest that in response to eardrum vibrations, the hammer and anvil pivot about their junction, causing the stirrup to move into and out of the oval window like a piston.

The middle ear mechanism plays a vital role in improving the efficiency of this process. If the sound wave fell directly on the entrance to the inner ear, less than 1% of its energy would pass through; the rest would be reflected back out of the ear. Thanks to the intervention of the middle ear, about 50% of the sound energy is transmitted to the inner ear in the frequency range of greatest musical importance.

The amount of 'give' in a barrier can be measured by observing the motion of the barrier when a sound wave of known pressure amplitude falls on it. If the pressure amplitude is P, and the barrier vibrates with maximum velocity V, its *specific acoustic impedance* z is defined as the ratio of P and V: $z = P/V$.

An almost rigid barrier (like a wooden partition) vibrates very little for a given pressure amplitude; its specific acoustic impedance is therefore high. A membrane which flexes readily (like a drumskin) will vibrate much more strongly for the same pressure amplitude; it will have a much lower specific acoustic impedance.

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

(b)

[Cf. Campbell & Greated, "2. Hearing Musical Sounds", p. 45.] © OUP

instrumentos de pele em geral), sua matéria vibrará muito mais em resposta a esse mesmo som, tendo, consequentemente, uma muito menor impedância. Ou seja, obstáculos rígidos e que causam maior reflexão do som no ambiente possuem maior impedância que objetos menos rígidos e menos reflexivos.

A unidade de medida da impedância é o *rayl* (segundo o nome do cientista do século XIX Lord Rayleigh, responsável por sua conceituação). Uma camada de ar possui uma específica impedância acústica de *415 rayls*, e esta impedância é considerada como sendo tipicamente uma *baixa impedância*. Por consequência, um obstáculo com z = *415 rayls* transmitirá uma onda sonora de modo ideal, nas mesmas condições do ar. Quanto mais a impedância de um objeto se diferenciar deste valor, tanto maior será a fração de energia sonora refletida por esse mesmo objeto. Em suma: *objetos de alta impedância refletem mais o som; objetos de baixa impedância, ao contrário, absorvem mais o som.*

O fenômeno da impedância desempenha papel crucial na entrada do ouvido interno, a qual possui uma altíssima impedância de cerca de 150 000 *rayls*. Assim sendo, seria ineficiente fazer que uma onda sonora incidisse diretamente sobre o ouvido interno, pois que quase nenhum som poderia ser captado pela delicada estrutura do ouvido interno. A onda sonora seria praticamente toda refletida para fora. Mas ao invés disso, o

An almost rigid barrier (like a wooden partition) vibrates very little for a given pressure amplitude; its specific acoustic impedance is therefore high. A membrane which flexes readily (like a drumskin) will vibrate much more strongly for the same pressure amplitude; it will have a much lower specific acoustic impedance.

The unit of specific acoustic impedance is the *rayl* (named after the nineteenth century scientist Lord Rayleigh). A 'wall' of air has a specific acoustic impedance of 415 rayls (Kinsler et al. 1982, p.111). Thus a barrier with $z = 415$ rayls will transmit a sound wave perfectly; the more its impedance differs from this value the greater will be the fraction of the sound energy reflected. The entrance to the inner ear shows a specific acoustic impedance of about 150,000 rayls (de Boer 1980, p.113). It would clearly be very inefficient to allow the sound wave to fall directly on this barrier. Instead it falls on the eardrum.

som chega antes ao tímpano, e a força aí exercida é igual à pressão do som multiplicada pela área da membrana timpânica. Essa força é transmitida pelos três ossículos à janela oval. Uma vez que a janela oval possui uma área 25 vezes menor do que a área do tímpano, a pressão sonora será elevada, nesse processo, pelo fator 25. Além disso, a ação de "alavanca" dos três ossículos aumenta ainda a pressão sonora pelo fator 2, ao mesmo tempo em que reduz a velocidade da janela oval pelo mesmo fator. Ou seja, a pressão sobre a janela oval acaba sendo cerca de 50 vezes maior que a exercida sobre o tímpano, enquanto que a velocidade de amplitude é reduzida pela metade, fazendo, afinal de contas, que o ouvido médio funcione como uma espécie de amplificador:

tímpano	*janela oval*
área ≅ 75 mm²	área ≅ 3 mm²
pressão = p	pressão = 50 p
velocidade = v	velocidade = 0,5 v

Lembrando-nos que a impedância é a *razão da amplitude da pressão pela velocidade da amplitude*, concluímos que a impedância da janela oval é *100 vezes maior* que a do tímpano. Uma vez que a impedância da janela oval é de cerca de *150 000 rayls*, a do tímpano é apenas de cerca de *1500 rayls*. A impedância do tímpano é, pois, cerca de três vezes maior que a de uma barreira de ar, de forma que nem toda a energia sonora é transmitida para os ossículos do ouvido médio. Cerca da metade da energia é, pois, refletida de volta no âmbito de frequências médias do ouvido humano. Já com relação a frequências abaixo de algumas centenas de Hz ou acima de 10 kHz, a impedância do tímpano aumenta consideravelmente por fatores relacionados à massa e à rigidez do próprio mecanismo do ouvido médio.

2.2.2. O reflexo acústico

Todos nós estamos familiarizados com nosso reflexo visual quando uma luz forte incide em nossos olhos: piscamos instintivamente. Uma similar proteção, denominada *reflexo acústico*, ocorre quando ouvimos um som muito forte e abrupto: um pequeno músculo no ouvido médio puxa o estribo para fora da janela oval, reduzindo o montante de energia transmitida para dentro do ouvido interno, protegendo-o. Uma vez que tal redução será significativa apenas em relação a frequências que se situem abaixo de cerca de 1000 Hz, tal proteção instintiva adquire a função de uma *filtragem* dos componentes mais graves de um complexo sonoro.

O reflexo acústico leva mais ou menos 1/10 de segundo para se realizar após a chegada de um som forte. Dessa forma, ele não pode proteger o ouvido de impulsos sonoros mais rápidos do que isso, tais como o ruído de

um tiro, por exemplo.

página 72

this barrier. Instead it falls on the eardrum. The force exerted on the eardrum is equal to the pressure times the area; this force is transmitted through the ossicles to the oval window. Since the oval window has an area about one twenty-fifth of the vibrating area of the eardrum, the pressure on the oval window is increased by a factor of 25 over that on the eardrum. In addition, a lever action in the ossicles increases the pressure by another factor of roughly 2, while reducing the oval window velocity by the same factor. Thus the pressure at the oval window is about 50 times greater than that on the eardrum, while the velocity amplitude is halved (Fig. 2.8).

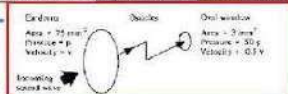
Fig. 2.8. Changes in pressure and velocity between eardrum and oval

OS DADOS DESTA FIGURA, TRANSFORMADOS EM TABELA, SAO REPRODUZIDOS SEM CITAÇAO DE FONTE

Figura 2.8, pagina 46

Remembering that the specific acoustic impedance is the ratio of pressure amplitude to velocity amplitude, we see that the impedance at the oval window is about 100 times that at the eardrum. Since the oval window impedance is around 150,000 rayls, the impedance at the eardrum is about 1/100th of this, or 1500 rayls. This is still about three times the impedance of a layer of air, so that not all the sound energy is transmitted through the ossicles to the middle ear. About half the energy in the sound wave is reflected back up the ear canal for mid-range frequencies. For frequencies below a few hundred hertz, or above 10kHz, the impedance of the eardrum is considerably increased by factors related to the mass and stiffness of the middle ear mechanism.

The acoustic reflex

When a bright light flashes in our eyes we instinctively blink. A similar protective reaction, called the *acoustic reflex*, comes into play when a very loud sound is heard. A small muscle in the middle ear pulls the stirrup back from the oval window; this reduces the amount of sound energy transmitted to the delicate mechanism of the inner ear. Since this reduction is only significant for frequencies below about 1000 Hz, it has the effect of filtering out the low pitch components of a complex sound (Morgan and Dirks 1975).

The reflex takes about a tenth of a second to come fully into play after the onset of a loud sound (Møller 1974). It thus cannot shield the ear from a sudden impulsive sound, such as a pistol shot, which can reach a dangerous level in a much shorter time.

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

Steady state and transient

The measurement shown in Fig. 1.5 was made about one second after the note was first sounded. The displacement-time graph shows a steady pattern in which all the peaks are the same height above the zero line – that is, the amplitude is constant. However, if we look with our position detector at the string during the first tenth of a second after the bow is applied (Fig. 1.6 (a)), we see that the vibrations do not start immediately at full amplitude, but take several cycles to build up. The nature of this build-up will of course depend on the type of attack, which is one of the most important aspects of string technique. Our study of string vibrations must therefore include this *transient* part, when the amplitude is changing, as well as the *steady state* part, when the tone has stabilised and the amplitude is constant.

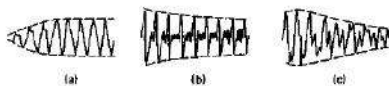



Fig. 1.6. Displacement-time curves for the first 100 ms of (a) cello string; (b) piano string; (c) drumhead.

In many musical sounds there is no steady state part at all. In the first bar of Fig. 1.1 the cello and the drum each play an E♭, as does the piano at the beginning of the second bar. The cello note is sustained by continuous bowing; the other notes die away, that of the drum more rapidly than that of the piano. Looking at the piano string and the drumhead with our position detector, we find corresponding patterns of vibration: during the first tenth of a second the amplitude of the piano string has decreased to about 80% of its original value (Fig. 1.6 (b)), whereas the drumhead amplitude has dropped to less than 30% (Fig. 1.6 (c)).

Amplitude envelope

In each of the displacement-time graphs of Fig. 1.6 we have drawn a broken line which just touches each peak of the vibration curve; another broken line touches each trough. These two lines define the ***amplitude envelope*** of the vibration. When we focus our attention on the amplitude envelope we are looking at the way in which the vibration grows and decays, rather than the details of the motion in each cycle. This overall pattern of growth or decay is an important characteristic of a particular instrument's vibrations: the amplitude envelopes of the cello, piano and drum shown in Fig. 1.6 are strikingly different.

Of course, the graphs in Fig. 1.6 cover only the first tenth of a second of each note. If we wish to see how the amplitude changes on a longer time scale, we can slow down the oscilloscope spot so that it takes longer to complete one traverse of the screen. Fig. 1.7 shows results obtained with the spot's horizontal speed reduced by a factor of 50, so that the time taken for each traverse is increased from one tenth of a second to 5 seconds. The wiggles of the individual vibration cycles can no longer be distinguished: the spot acts like a paintbrush, filling in the space between the two lines of the amplitude envelope.

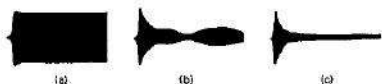



Fig. 1.7. Amplitude envelopes measured during the first 5 s of (a) sustained cello string vibration; (b) piano string vibration; (c) drumhead vibration.

On this timescale, we see the cello string vibrations (Fig. 1.7 (a)) rising very quickly to their steady value. For this measurement the note was played without vibrato and prolonged for more than five seconds; after the initial transient the amplitude envelope is composed of two horizontal lines. In contrast, the drumhead vibrations (Fig. 1.7 (c)) decay very rapidly

during the first quarter of a second; after this the rate of decay slows down, and vibrations can still be detected for several seconds after the stroke.

1.1.5. Regime estacionário e transitórios (ou transientes)

As vibrações não começam imediatamente com amplitude máxima, mas necessitam de vários ciclos e, consequentemente, de algum tempo para atingi-la. A natureza desse tipo de evolução inicial do som depende de seu *ataque*. Ataques mais abruptos ou duros atingem mais rapidamente a amplitude máxima do som, ataques mais brandos ou moles precisam de mais tempo para isto.

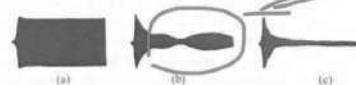
Qualquer parte que indique alguma alteração da amplitude é denominada *transitório* ou *transiente*. Por definição, o ataque é o *regime transitório inicial*, ou *transiente de ataque*. Em contrapartida, as partes que representam uma certa estabilização da intensidade, com amplitude constante, constituem o *regime estacionário* ou *sustentação do som*. Em geral, mesmo na sustentação de um som considerado como bastante estável dinamicamente tem-se pequenas variações de amplitude, e praticamente apenas sons gerados eletronicamente são capazes de uma total estabilidade em amplitude por longos períodos. São tais variações mínimas do som em momentos que ele aparentemente se comporta de modo estável que conferem uma certa riqueza ao espectro sonoro. A rigor, portanto, não existem absolutamente regimes rigorosamente estacionários na esmagadora maioria dos sons. De qualquer forma, a estabilização em amplitude de um som em seu regime de sustentação é, estatisticamente, claramente distinguível de fases essencialmente dinâmicas e instáveis do evento sonoro, tais como seu fim e, principalmente, seu início.

Primeiros 100 ms de (a) uma corda de violoncelo; (b) uma corda de piano; (c) uma membrana de percussão

[Cf. Campbell & Greated, "1. The Creation and Transmission of Musical Sounds", p. 12.] © OUP

A curva de envelope da corda do piano, exemplificada abaixo (Exemplo 6b), é particularmente interessante, pois cresce em amplitude já quando não se esperava mais que houvesse força dinâmica do som. Tal fato decorre da mútua interferência no comportamento dinâmico de cada um de seus componentes senoidais, os quais ressoam em sua privilegiada caixa de ressonância.

Exemplo 6

Envelope de amplitude durante os primeiros 5 segundos de (a) uma corda de violoncelo em vibração; (b) uma corda de piano em vibração; (c) uma vibração de membrana percussiva

[Cf. Campbell & Greated, "1. The Creation and Transmission of Musical Sounds", p. 13.] © OUP

De acordo com o modelo de envelope dinâmico traçado por Herrmann Helmholtz (1821-1894) – que está para a acústica assim como Freud para a psicanálise –, o som possui, em geral, três fases essenciais, correspondentes

a seu início, meio e fim: *ataque*, *regime estacionário* e *extinção*. Com o passar dos tempos, um maior detalhamento na morfologia sonora ocasionou uma descrição mais atenta, ainda que genérica, do envelope dinâmico, em que o som passa a ter, *grosso modo*, quatro fases principais: o *ataque* (em inglês: *attack*), momento inicial do som; a *primeira queda* ou *decaimento* (*decay*), perda de energia ocorrida logo após a grande energia liberada em geral no transiente de ataque; o *regime estacionário, de permanência* ou *sustentação* (*sustain*); e a *queda final* ou *extinção* (*release*), momento de esvaecimento do som. Tais nomenclaturas são responsáveis pelos módulos ADSR dos sintetizadores, nos quais pode-se estipular o tempo de cada

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

invisible horizontal layers, as in Fig. 1.18. We have seen that, after it has been struck, the membrane vibrates up and down (see Fig. 1.6 (c)). When it is rising, the layer of air in contact with it will also be forced upwards. This layer cannot rise freely, however, since it is obstructed by the layers of air above it; it is squeezed and compressed between the membrane and the higher layers. After a short time it is able to expand again by squeezing and compressing the next layer up; in turn, this layer relieves the pressure on it by compressing the layer above it; and so a pulse of compression travels upwards from the drumhead through the surrounding air.

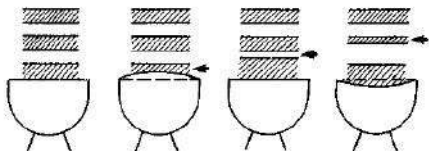



Fig. 1.18. A compression pulse travelling upwards from a kettledrum membrane. Alternate layers of air are shown hatched and unhatched; the compressed layer is shown by an arrow.

Meanwhile, the membrane will be falling again. The air just above it now has a larger volume to fill, so it expands into it. Consequently, the pressure drops below its normal atmospheric value. The air in the next layer up, finding a reduced pressure from below, also expands downwards; and thus a pulse of expansion follows the pulse of compression outwards from the drumhead.

As the membrane vibrates up and down, a regular train of pulses, alternating compression and expansion, is generated in the air. We call this pulse train a *sound wave* – the analogy with ripples generated by a stone thrown into a pool of water was already glimpsed by the Roman architect Vitruvius (Vitruvius 1960, pp.138–139). Indeed, sound waves can travel through liquids and solids as well as through air, and it is now possible to listen to music while swimming underwater in certain pools. However, we shall concentrate here on the more traditional musical environment, and limit our discussion to sound waves in air.

Longitudinal wave motion

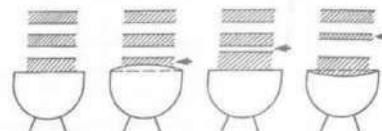
If we examine a small segment of the air in the path of a sound wave, we find that it vibrates backwards and forwards along the direction of the wave. This type of motion is known as *longitudinal wave motion*. In Chapter 5 we shall come across another type of wave motion, in which the particles of the medium transmitting the wave vibrate in a direction

perpendicular to the direction of the wave; this is known as *transverse wave motion*. Strings and membranes can carry both transverse and longitudinal waves, but only longitudinal waves can travel through air.

Since air is an invisible gas, it is a little difficult to illustrate the motion involved in the transmission of a sound wave. Some of the important features can perhaps be seen more clearly in the analogy shown in Fig. 1.19. Here we have a long line of people standing side by side and holding hands. To start with they are all upright and the same distance apart, as in line 1 of the diagram. The person on the extreme left of the line, whom we call A, starts to sway from side to side; lines 2 to 6 of Fig. 1.19 are pictures separated by equal time intervals, showing how the rocking of A gradually affects the rest of the line.

forem. Esta concepção de Arquitas, em oposição às especulações de sua época, deslocara o foco de atenção da fonte geradora do som (como no caso do emprego de um monocórdio – instrumento presumivelmente inventado por Pitágoras (cerca de 570-490 a.C.)) para o próprio ar e, consequentemente, para a atmosfera. Quando, por exemplo, um instrumento de percussão de pele é tocado por uma baqueta, sua membrana passa a vibrar alternadamente para cima e para baixo, conforme a força do golpe efetuado, e toda uma série de pulsos, que se alternam entre compressão e expansão das camadas de ar, é gerada na atmosfera. É a tal fenômeno que se dá o nome de *onda sonora*.

Exemplo 20

Um pulso comprimido viajando para o alto a partir de uma membrana de um tímpano. Faixas alternadas de ar são visualizadas de modo comprimido ou estendido (as compressões são indicadas por flechas)

[Cf. Campbell & Greated, "1. The Creation and Transmission of Musical Sounds", p. 23.] © OUP

Ainda que este exemplo, descrito por Campbell & Greated, seja simplificado, sugerindo que a onda sonora viaja apenas em direção ascendente, ele é bem ilustrativo das consequências geradas nas moléculas de ar por um simples toque de tambor. É necessário observar, contudo, que as ondas provenientes de um caso como esse são, na realidade, irradiadas igualmente para os lados, propagando-se por todas as direções. Além do mais, ondas sonoras podem ser propagadas não só através do ar, mas também de sólidos e líquidos. Assim sendo, somente no vácuo é que se ausenta o fenômeno sonoro.

1.2.2. Comprimento e pressão de uma onda sonora

Como acontece, de fato, a propagação de uma onda sonora através do ar? Na realidade, é como se um pequeno segmento de ar (de moléculas de ar) vibrasse para frente e para trás por toda a direção da onda, da sua proveniência até onde sua energia (força) permitisse que ela chegasse, fazendo que denominemos tal forma de propagação de onda sonora como um *movimento ondular longitudinal*. Porém, não existe deslocamento contínuo de ar propriamente dito na direção do percurso de uma onda sonora, pois se observarmos

um pequeno segmento de moléculas de ar e acompanharmos seu comportamento durante toda a emissão de um som, notaremos que o espaço físico por ele ocupado durante a existência do som será estatisticamente o mesmo que ocupava antes da geração da onda sonora em questão, permanecendo, após a extinção da onda, praticamente no mesmo lugar. Uma analogia muito pertinente para entender tal fenômeno é a observação de uma superfície de um lago, no meio do qual atira-se uma pedrinha, analogia esta que remonta ao estoico grego Crisipo (280-208 a.C.) e que fora defendida no século I d.C. pelo arquiteto romano Vitrúvio. A pedrinha ocasionará uma série de círculos que se propagam, durante um certo tempo (dependente da força com a qual a pedrinha foi arremessada), do centro para as bordas do lago, sem que uma certa mancha ou sujeira na superfície da água se desloque junto com esses círculos. É claro que a vibração gerada na superfície da água fará que essa mancha se mova de alguma forma – aliás, não seria necessária nenhuma pedrinha para pôr em movimento as moléculas de água, uma vez que, como sabemos, tudo está em permanente movimento. Porém, estatisticamente, essa mancha permanece no mesmo lugar, e os círculos que se propagam do centro às bordas simplesmente passam por ela. É isto, mais ou menos, o que ocorre com o som em relação às camadas de ar na atmosfera. Será a sucessão de compressões e dilatações (ou rarefações) das camadas de ar que fará que o som se propague, não a locomoção na atmosfera de tais camadas.

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

The harmonic spectrum

In many cases the musical effect of a complex vibration depends almost entirely on the amplitudes of the Fourier components, and hardly at all on their phases. If a loudspeaker were vibrating with the displacement-time curve shown by Fig. 1.12 (a), we would hear a certain sound; if the pattern changed to that of Fig. 1.13 (a) we would not notice any difference in the nature of the sound. If the relative proportion of the two components changed significantly, however, we would immediately be aware of a change in the sound quality. (See, however, Chapter 3, p.145.)

For this reason it is often adequate to describe a complex vibration by recording only the amplitudes of the Fourier components. The successive components have frequencies of 1,2,3,4... times the fundamental frequency; they are known as the 1st, 2nd, 3rd, 4th... *harmonics*. Thus the 1st harmonic is the component whose frequency is the fundamental repeti-

19

The Musician's Guide to Acoustics

tion frequency, the 2nd harmonic has twice the fundamental frequency, and so on.

Os sucessivos componentes senoidais – parciais – contendo frequências de 2, 3, 4... vezes a frequência fundamental são conhecidos como, respectivamente, 2º, 3º, 4º... *harmônicos*. O 1º harmônico do espectro é também a própria fundamental do som. É comum a confusão acerca desta terminologia, designando-se erroneamente por 1º harmônico o primeiro parcial que se sucede à frequência fundamental; mas devemos ter clareza de que já a frequência fundamental constitui o primeiro parcial harmônico do espectro de um som periódico.

The customary way of representing the strengths of the different harmonics is in the form of a *harmonic spectrum*. This is a set of vertical bars, labelled by the appropriate harmonic numbers increasing from left to right. The height of each bar is proportional to the amplitude of the corresponding harmonic. Fig. 1.14 shows the harmonic spectrum obtained by analysing either of the vibrations illustrated by Figs 1.12 (a) and 1.13 (a).

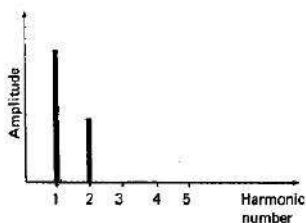



Fig. 1.14. Harmonic spectrum corresponding to either of the vibration patterns in Figs 1.12 (a) and 1.13 (a).

The displacement-time curve for the cello string (Fig. 1.5) was obtained by feeding the electrical signal from the position detector into an oscilloscope. If instead we feed the signal into a *frequency analyser* we see on its screen a picture of the corresponding harmonic spectrum (Fig. 1.15). This shows that there are four significant harmonics in the signal. We can interpret this as implying that the complex vibration of the cello string is equivalent to four simultaneous simple harmonic vibrations, each with a frequency and amplitude corresponding to one of the harmonic components. (In fact there are also several higher harmonics of low amplitude, which have been omitted from Fig. 1.15 to simplify the discussion.)

O modo costumeiro de representar a força (amplitude) dos diferentes harmônicos é o *espectro harmônico*, que, ao contrário da forma de onda (que representa a projeção da amplitude no tempo), corresponde à distribuição de energia (amplitude de cada parcial) em relação às frequências:

Exemplo 15

Espectro harmônico de um som, com amplitude distinta de parciais em regiões distintas de frequência

Através do espectro harmônico, vislumbra-se o *envelope espectral* do som, ou seja, o perfil delineado pela amplitude dos parciais do grave ao agudo, e que não deve ser confundido com o *envelope dinâmico* ou *curva de envelope* do som (de que já tratamos), através da qual descreve-se todo o desenvolvimento dinâmico-temporal do som de seu ataque à sua extinção. O envelope espectral é, na verdade, um retrato instantâneo do som em um de seus momentos, não dando conta da evolução geral no tempo de sua amplitude resultante, mas antes de sua constituição harmônica e da relação em amplitude entre seus parciais em um dado momento.

Na representação por forma de onda, será a soma das amplitudes dos componentes senoidais que ocasionará a ondulação resultante. No Exemplo 16, bem simples e ilustrativo, a curva resultante (a) nada mais é que a soma das amplitudes do 1º harmônico ou fundamental (b) com o 2º harmônico, de dobro da frequência e metade da amplitude da fundamental (c).

40 Flo Menezes

Diffraction

Another important property of sound waves is their ability to bend round obstacles. If we go to a concert and find ourselves sitting behind a pillar, we can still hear the performers even though we cannot see them. This is partly because of sound waves which reach us indirectly after several reflections, but partly because the wave which travels directly towards us

can bend or *diffract* round the pillar. Fig. 1.24 (a) illustrates how this happens. We imagine ourselves looking down on a solid rectangular pillar while a sound wave approaches from the left. The presence of the wave is shown by the series of parallel straight lines, and the depth of shading indicates the strength of the sound. Immediately behind the pillar is an area of 'sound shadow': a listener here would receive very little diffracted sound. But if he backed off to the right, still keeping directly behind the pillar, he would find the strength of the sound increasing. In effect, the sound waves lap around either side of the pillar and join up again on the far side. By the time our listener reached the region at the right hand side of our diagram, he would be receiving a sound wave hardly affected by the presence of the pillar.

In a similar way, when a sound wave passes through an aperture such as a door, it can bend round the sides of the door and spread out in the region beyond, as shown in Fig. 1.24 (b). The implications of this for the radiation of sound from wind instruments are taken up in Chapter 5.

Not all sound waves show diffraction to the same extent. A wave will only be significantly diffracted by an obstacle if the wavelength is larger than the width of the obstacle. When the wavelength is much smaller, we have the situation illustrated in Fig. 1.25 (a): the wave passes by without noticeably bending, and a soundless area stretches behind the pillar. Similarly, when a wave passes through an aperture much larger than its wavelength (Fig. 1.25 (b)) it does not bend significantly into the regions of sound shadow on either side.

1.2.7. Difração

Outra importante propriedade das ondas sonoras é sua habilidade em circundar obstáculos. Tal fenômeno é denominado *difração*. Quando ouvimos um som, nossa escuta não recebe apenas ondas sonoras que nos atingem após diversas reflexões, mas também a onda que se propaga diretamente em nossa direção, sem qualquer reflexão, e que, para chegar até nós, sofre difração por volta dos obstáculos físicos que se situam entre nós e a fonte emissora.

Consideremos, por exemplo, um pilar que se situe entre nós e a fonte sonora. Imediatamente após o pilar, existe uma área de "sombra sonora" causada pelo obstáculo: um ouvinte que se situasse justamente ali recebe-

um som ligeiramente difratado. O som, ao passar pelo pilar, se recompõe paulatinamente e reocupa toda a área da sala após um certo espaço – Exemplo 24a. O caso inverso pode ser imaginado: ao invés de se ter um pilar como obstáculo em meio à sala, tem-se uma parede por toda a sua extensão, excetuando-se uma pequena abertura de dimensões similares ao pilar do Exemplo 24a. A difração, nesse caso, ocasionará a reocupação do ambiente pela onda sonora que passa por essa abertura – Exemplo 24b.

Ambos os casos de difração dependerão da relação entre a frequência do som que se propaga e o tamanho quer seja do obstáculo (no caso do Exemplo 24a), quer seja da abertura (no caso do Exemplo 24b). Assim sendo, nem toda onda sonora sofre a mesma difração na mesma medida: uma onda apenas será difratada de modo significativo por um obstáculo ou por uma abertura se seu comprimento de onda for *maior* do que a espessura do obstáculo ou da fenda, ou seja, se o som for suficientemente *grave*; caso o comprimento de onda seja bem menor (típico das frequências mais agudas), não haverá difração suficiente, e será gerada uma lacuna de som logo após o obstáculo ou, no caso de uma abertura, o som tenderá a continuar se propagando apenas na dimensão da fenda, não mais se espalhando pelo espaço (como bem ilustra o Exemplo 25, na página seguinte).

Em suma, para haver difração e o som poder circundar os obstáculos ou preencher os espaços após frestas em sua propagação, é necessário que o comprimento de onda deste som seja maior que a espessura dos obstáculos ou que a dimensão das frestas. Obstáculos em uma onda sonora de comprimentos de onda suficientemente curtos acarretam "sombras acústicas" da mesma forma que o fazem em relação a um feixe luminoso (já que a luz é um

outro tipo de onda, com comprimento de onda extremamente curto, demonstrando igualmente difração apenas quando encontra pequenos obstáculos ou ínfimas aberturas). Longos comprimentos de onda correspondem a baixas frequências, e baixas frequências correspondem a notas musicais mais graves. Consequentemente, *sons graves sofrem maior difração que sons agudos*. Daí a razão de nos referirmos em geral a sons graves reportando-nos a uma maior *presença* sonora: *sons graves possuem a característica de preencher melhor os ambientes*, e tal característica decorre diretamente do fenômeno da difração. Esta é também a razão de dispormos com bastante cuidado os alto-falantes de frequências agudas de nossos sistemas de som, enquanto que os alto-falantes de baixas frequências não necessitam estarem dispostos de modo tão cuidadoso, pois aonde quer que estejam, acabarão por gerar sons que preencherão, de toda forma, o ambiente (CD 19).

Por fim, uma situação particular ocorre quando tanto o comprimento de onda quanto o obstáculo possuem mais ou menos a mesma magnitude. Nesse caso, o obstáculo servirá, na verdade, de reemissor do som, irradiando-o em todas as direções por meio de reflexões sonoras.

Beats

There is, however, one situation familiar to all musicians in which constructive and destructive interference are obvious (sometimes disastrously so). If two instruments play a slightly mistuned unison, a distinct throbbing or *beating* is heard in the sound. When the two notes are very close in pitch the rate of beating is slow; if they drift further apart the rate of beating increases.

Because the waves generated by the two instruments have slightly different frequencies, their relative phase at the ear of the listener is constantly changing. At the start of the time represented by Fig. 1.32, the two waves are in phase; the peak of A adds to the peak of B to produce a double amplitude peak, corresponding to a loud sound. After a few cycles it is clear that A is vibrating more rapidly than B; eventually it is half a

cycle ahead, and a peak in A corresponds to a trough in B. At that point they are interfering destructively, and the sound has died away to nothing. But A goes on gaining on B, until it is one whole cycle ahead; the waves are again interfering constructively, and the sound has maximum loudness. This waxing and waning of the sound continues as A gains further cycles on B.

Listening for beats can be a useful guide when tuning instruments; it is a standard technique in piano tuning (see Chapter 7, p.252). By counting the number of beats per second, the frequency difference between two pure tones can be estimated. For example, consider two tones with frequencies of 100 and 103 Hz respectively; in one second the higher tone will have gone through three cycles more than the lower, generating three cycles of beating. In general, the number of beats per second is equal to the difference in frequency between the two component tones. Beating between complex tones is less straightforward to analyse, since many pairs of component pure tones can be beating simultaneously. This is the basis of Helmholtz's theory of dissonance (see Chapter 4).

cycle ahead, and a peak in A corresponds to a trough in B. At that point they are interfering destructively, and the sound has died away to nothing. But A goes on gaining on B, until it is one whole cycle ahead; the waves are again interfering constructively, and the sound has maximum loudness. This waxing and waning of the sound continues as A gains further cycles on B.

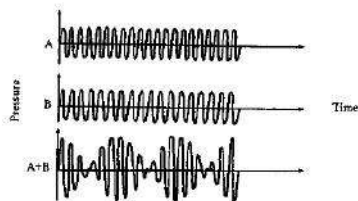



Fig. 1.32. Beats due to the addition of two sine waves with slightly different frequencies.

Listening for beats can be a useful guide when tuning instruments; it is a standard technique in piano tuning (see Chapter 7, p.252). By counting the number of beats per second, the frequency difference between two pure tones can be estimated. For example, consider two tones with frequencies of 100 and 103 Hz respectively; in one second the higher tone will have gone through three cycles more than the lower, generating three cycles of beating. In general, the number of beats per second is equal to the difference in frequency between the two component tones. Beating between complex tones is less straightforward to analyse, since many pairs of component pure tones can be beating simultaneously. This is the basis of Helmholtz's theory of dissonance (see Chapter 4).

1.2.10. Batimentos, relações de fase e seus efeitos no espaço

Interferências construtivas e destrutivas podem conviver e, via de regra, convivem juntas na prática musical. O fenômeno do *batimento*, tão conhecido pelos músicos e tão importante na prática musical, e que Helmholtz afirma ter sido descoberto por Georg Andreas Sorge (1703-1778) em 1745 e posteriormente discutido ainda como total novidade por Giuseppe Tartini (1692-1770) em 1751 e por Romieu em 1753, é um bom exemplo da relevância de ambos os tipos de interferência (construtiva e destrutiva) em um mesmo contexto musical.

Os batimentos entre dois instrumentos se dão pelo fato de as ondas geradas por ambos terem frequências ligeiramente diferentes, ocasionando uma constante mutação, no ouvido, de suas fases relativas. Quanto mais próximos em frequência forem dois sons, tanto mais lentos serão os batimentos decorrentes. Por outro lado, quanto mais se distanciarem em frequência, tanto mais rápidos serão os batimentos.

Em geral, *o número de batimentos por segundo é igual à diferença em frequência entre os dois sons concomitantes.*

O Exemplo 31 consiste em outra representação dos batimentos, aqui entre os sons senoidais A e B. O som B é ligeiramente mais grave que o som A, e tal diferença ocasiona, além da pequena diferença em frequência, uma paulatina *alteração da relação de fase* entre os periodos dos dois sons. Quando existe coincidência entre as cristas de onda dos períodos de A e de

B, ambos os sons se reforçam mutuamente, em interferência construtiva, aumentando a amplitude do som resultante A+B. Porém, quando o pico máximo de A coincide com o pico mínimo de B, existe oposição de fase, em interferência destrutiva e anulação do som. Tais momentos de aumento de amplitude seguido de anulação do som resultam numa pulsação em amplitude do som resultante que equivale à diferença entre as frequências de A e B, constituindo os batimentos percebidos pelo ouvido como uma *modulação de amplitude.* (No caso do Exemplo 31, notamos que existe, no trecho exemplificado, três batimentos, e se considerarmos este trecho como equivalente a 1 segundo, tais batimentos indicam-nos que a diferença entre A e B, durante o trecho em questão, é de 3 Hz.)

Batimentos entre sons compostos e complexos são mais difíceis de serem analisados, uma vez que muitos pares de sons podem ocasionar batimentos simultâneos. Nisso consistiu a teoria da *consonância e dissonância* de Helmholtz: quanto menos batimentos forem ocasionados por dois sons, mais consonantes tais sons seriam, de acordo com a concepção clássica do grande físico alemão. De toda forma, os batimentos existentes entre as fundamentais demonstram-se, em geral, como os mais evidentes.

O que ocorre, de fato, com a percepção de dois sons senoidais que ocasionam batimentos?

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

The Doppler effect

There is one other property of sound waves in air which deserves a brief mention. We are all familiar with the way in which the pitch of a fire engine siren appears to drop as the engine races past. The reason for this effect, known as the *Doppler effect*, is illustrated in Fig. 1.33. When a source of sound is approaching the listener, the distance between pressure peaks (the wavelength) is reduced by the distance travelled by the source during the cycle between the peaks. The wave appears 'squashed up'. Since the speed of the wave is unaffected by the motion of the source, the reduction in wavelength must correspond to an increase in frequency: the

pitch is raised. The reverse happens as the source recedes. The wave is 'stretched out'; the wavelength increases and the frequency and pitch drop.

For source speeds up to about 100 mph, the pitch change is proportional to the speed. The note of a fire engine passing at 60 mph changes by almost exactly a minor third.

The 'Leslie speaker', described in Chapter 13, makes use of the Doppler effect; apart from this example it is of little significance in musical life. It did, however, occur to one of the authors, who found himself trying to play jazz on a procession float travelling at around 20 mph, that an observant listener should notice the pitch of the 'Basin Street Blues' drop by a semitone as the band rolled by.

1.2.11. O "efeito Doppler"

A relação existente entre freqüência e comprimento de onda, acrescida da relação de distância física entre fontes emissora e receptora do som, pode, quando houver deslocamento de no mínimo uma das fontes (ou da fonte emissora, ou da fonte receptora), gerar fenômenos subjetivos de fortes conseqüências. É o que ocorre quando ouvimos um som de sirene de ambulância passando por nós: a altura (freqüência) do som da sirene parece subir quando a ambulância se aproxima e parece cair quando o veículo se distancia de nós. Tal fenômeno é conhecido como *"efeito Doppler"*, descoberto em 1842 pelo físico austríaco Christian Doppler (1803-1853).

Por que isso acontece?

Quando uma certa fonte sonora (F) se aproxima do ouvinte (trajeto de B a A do exemplo 33), a distância entre os picos de pressão (responsáveis pelo comprimento de onda) é reduzida pela distância percorrida pela fonte durante o ciclo entre os picos. A onda parece para esse ouvinte, então, como que "comprimida". Ainda que a onda em si mesma não seja afetada pelo movimento da fonte, tal redução no comprimento da onda corresponde, no ouvido, a um aumento de sua frequência. O ouvido, na realidade, "compensa" o encurtamento do comprimento de onda alterando a frequência do som para o agudo. O contrário ocorre quando a fonte sonora se distancia: a onda se "estende" do ponto de vista do receptor que continua parado, o comprimento de onda aumenta para o receptor e seu ouvido "compensa" este aumento com um decréscimo da frequência percebida.

O mesmo fenômeno também se dá quando a fonte sonora permanece no mesmo local e o ouvinte se locomove. É fácil deduzirmos o porquê disso: quando o ouvinte se distancia de uma fonte sonora estacionária, as mais recentes ondas sonoras emitidas por essa fonte necessitam percorrer um maior caminho até atingirem o ouvinte que parte, gerando nele a percepção de uma frequência mais grave.

Period and frequency

A vibration is called *periodic* if the motion repeats itself exactly after a time interval T, which we call the *period* of the vibration. The time taken to complete one up-and-down cycle of the cello string is represented in Fig. 1.5 by the horizontal distance between a and e. The next cycle takes a time represented by the distance between e and i, which is the same as that between a and e. Thus the up-and-down motion of the string is a periodic vibration, and its period T is measured by the distance a–e in Fig. 1.5. Since we know the horizontal speed of the spot which drew Fig. 1.5, we can mark out time intervals along the horizontal axis: a convenient time unit for vibrations of musical significance is the millisecond ($^{1}/_{1000}$ second), abbreviated ms. Observing that two cycles of the cello string vibration take just about 25 ms, we can see that the period is approximately $T = {}^{25}/_{2}$ ms = 12.5 ms. A careful measurement gives the value T = 12.8 ms.

Since the shape of the displacement-time graph is constant from cycle to cycle, we could equally well measure the period by the time between two successive high points (represented by the distance c–g), or between two successive upward crossings of the zero displacement line (represented by the distance b–f). In each case we would get the same result: T = 12.8 ms.

Musical vibrations are usually discussed in terms of frequency rather than period. The frequency (for which we shall use the symbol f) is the number of cycles of the vibration which are completed in one second. There is a straightforward relationship between period and frequency, which we can express by the equation

$$f = 1/T$$

All that this means is that if we write the period T as a fraction of a second, we get the frequency by turning the fraction upside down. For our example of the cello string, the period T is 12.8 ms, or $^{12.8}/_{1000}$ seconds. Turning this fraction upside down gives us $^{1000}/_{12.8}$, which is 78. Thus the cello string vibrates up and down 78 times every second. The accepted unit of frequency is the hertz (abbreviated Hz); the statement that the period of

10

The creation and transmission of musical sounds

the string is 12.8 ms is therefore equivalent to the statement that its vibration frequency is 78 Hz.

We can also work this relationship backwards to find the period of a vibration if we know its frequency. A standard A tuning fork is labelled 440, which means that the frequency of vibration of its prongs is 440 Hz. Treating this as the fraction $^{440}/_{1}$, we can turn it upside down to find the period: $T = {}^{1}/_{440}$ seconds. Since there are 1000 milliseconds in one second, we can express this as $T = {}^{1000}/_{440}$ ms = 2.3 ms. So one back-and-forth wiggle of the tuning fork prong takes just over two thousandths of a second.

1.1.2. Elementos discretos da vibração: período e freqüência

Uma vibração, tal como demonstrada acima, é chamada de *periódica* caso o movimento se repita de forma quase exata após um certo intervalo de tempo *T*. Tal intervalo de tempo é denominado *período* ou *ciclo* da vibração. No Exemplo 1, temos como possíveis ciclos ou períodos os segmentos *abcde*, *cdefg*, ou, iniciando-se pela fase positiva da amplitude da vibração, o segmento *bcdef*.

As vibrações sonoras são discutidas mais em termos de freqüência do que de período, uma vez que o conceito de freqüência tem maior proximidade com o fenômeno musical. E, nesse contexto, é de grande utilidade a medição do tempo pela unidade do *milissegundo* (1/1000 segundo, abreviado como *ms*).

Se observarmos dois períodos do Exemplo 1, vemos que eles duram juntos cerca de 25 ms, ou que cada período isoladamente dura exatamente 12,8 ms. Aplicando tais valores na equação acima, e se substituindo a unidade de 1 segundo por 1000 milissegundos, tem-se 1000/12,8 = 78. Diz-se pois que a frequência deste som é de 78 *Hertz* (abreviado *Hz*), em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894), que descobriu no século retrasado as ondas eletromagnéticas e a relação entre período e frequência.

Pode-se, inversamente, estabelecer a *duração do período* a partir da frequência do som em questão, onde teremos:

$$T = \frac{1}{f}$$

Substituindo a unidade de 1 segundo por 1000 milissegundos, a duração de um único período de, por exemplo, uma nota Lá 440 Hz é de apenas 2,3 ms, pois:

$$T = \frac{1000}{440} = 2{,}3 \text{ ms}$$

A *frequência* de um som (para a qual usa-se a abreviação *f*) é, por definição, o *número de ciclos ou períodos da vibração que se completam dentro de um segundo*. Se um som possui, por exemplo, 440,2 períodos por segundo, diz-se que sua frequência é, por princípio, de 440 ciclos por segundo (de forma abreviada: 440 cps). Se dizemos "por princípio", é porque por vezes o cálculo, mesmo em contextos musicais (como no caso das elaborações eletroacústicas em estúdio), leva em consideração os períodos "quebrados" dos sons, uma vez que, dependendo das circunstâncias, uma variação de 0,2 ciclo por segundo pode ocasionar interessantes fenômenos auditivos num dado contexto sonoro (tais como batimentos etc.).

A íntima relação entre período e frequência é expressa pela equação:

$$f = \frac{1}{T}$$

THE INNER EAR

Beyond the middle ear is another cavity in the bone of the skull. This is the *inner ear*, also known as the *labyrinth*. As the latter title suggests, it is a complicated series of interconnecting passages and chambers, which are filled by watery fluid. One part of the structure, the *semi circular canals*, gives us our sense of balance; the other major part, the *cochlea*, is responsible for our sense of hearing.

The cochlea is a tube about 35 mm long, coiled up like the shell of a snail (see Fig. 2.2). There are roughly 2½ turns between the base of the spiral and the apex; the tube is about 2 mm in diameter at the base, and gradually tapers down towards the apex.

In this compact little structure the vibrations transmitted by the middle ear generate electrical signals which are sent down the auditory nerve to the brain. Ever since the cochlea was first clearly identified and described in the seventeenth century, a debate has raged over its function in the hearing process (Carterette 1978). This debate has centred on a topic of great importance to musicians: the ability of the ear to distinguish between sounds of different pitch.

2.3. O Ouvido Interno

Também conhecido por *labirinto*, o ouvido interno é o lugar em que as informações sobre o fenômeno sonoro são convertidas em sinais elétricos e enviadas ao cérebro. Uma parte de sua estrutura, os *canais semicirculares*, são responsáveis por nosso *sentido de balanço e de equilíbrio*. A outra parte maior, a *cóclea*, é responsável por nosso *sentido de escuta* propriamente dito.

A cóclea é uma espécie de tubo de cerca de 35 mm de comprimento, em forma de concha ascendente espiralada. Nessa delicada espiral, há aproximadamente duas voltas e meia da base ao ápice da estrutura. O tubo tem cerca de 2 mm de diâmetro em sua base, estreitando-se gradualmente até sua ponta. Nessa pequena estrutura compacta, as vibrações transmitidas pelo ouvido médio geram sinais elétricos que são enviados, através dos nervos auditivos, ao cérebro.

A cóclea foi descrita pela primeira vez já no século XVII. Sua função primordial, como hoje se sabe, é a de ser o órgão responsável pela capacidade do ouvido em perceber sons de alturas distintas, e isto mesmo em meio a estruturas musicais contendo diversos sons simultâneos.

Textos quase idênticos

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

Structure of the cochlea

Fig. 2.12 shows a simplified cross-section of the cochlear tube. It is divided into three sections by two membranes which run practically the entire length of the tube. The *upper gallery (scala vestibuli)* is divided from the *cochlear duct (scala media)* by the very thin and flexible *Reissner's membrane*; separating the cochlear duct from the *lower gallery (scala tympani)* is the more substantial *basilar membrane*. Only at the apex of the spiral are the upper and lower galleries connected, through a hole called the *helicotrema*.

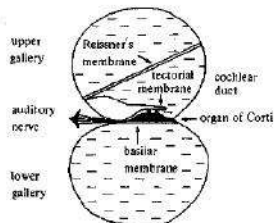



Fig. 2.12. Cross-section of cochlea.

The upper surface of the basilar membrane carries an array of hair cells which forms the *organ of Corti*. Leading out of the organ of Corti are about 30,000 nerve fibres, distributed more or less uniformly along the basilar membrane; these are the cables which carry the electrical signals to the brain. In order to understand how these electrical signals arise we must look at the motion of the basilar membrane when a sound is heard.

2.3.1. Estrutura da cóclea

Na parte de cima do tubo que constitui a cóclea, tem-se a chamada *galeria superior* (*scala vestibuli*), a qual é dividida, em meio ao *ducto coclear* (*scala media*), por uma membrana bastante delicada, denominada *membrana de Reissner*. Entre a *galeria inferior* (*scala timpani*) e a galeria superior, temos a *membrana basilar*, estrutura de grande relevância na percepção das alturas. Apenas no ápice da espiral é que ambas as galerias são conectadas uma à outra, através de um pequeno orifício denominado *helicotrema*.

A membrana basilar aumenta em extensão e diminui em rigidez da janela oval ao helicotrema. Sua superfície superior comporta uma série de células nervosas em forma de cílios, formando o *órgão de Corti*, descoberto por Marchese Corti em 1851. Nesse órgão, estão contidas cerca de 30000 fibras nervosas ou células ciliadas, distribuídas de forma mais ou menos uniforme ao longo de toda a membrana basilar. As extremidades das células capilares que emergem dos cílios no órgão de Corti são embebidas pela *membrana tectorial*, a qual se situa acima desse órgão. Os cílios nervosos do órgão de Corti constituem, poderíamos dizer, os "cabos elétricos" que

transmitem os sinais ou impulsos elétricos ao cérebro, o qual os processa e "interpreta".

Motion of the basilar membrane

Consider first the sequence of events caused by a single handclap near the ear. A pressure pulse arrives at the eardrum, and exerts an inward force on it. This force, multiplied by the middle ear mechanism, is transmitted to the stirrup footplate, pushing it through the oval window into the upper gallery of the cochlea (Fig. 2.13). The liquid in the upper gallery is almost incompressible, and the incursion of the stirrup footplate occurs too

The tips of the hairs which emerge from the hair cells in the organ of Corti are embedded in the *tectorial membrane*, which lies above the organ. When the basilar membrane flexes, the tectorial membrane slides across it; this bends the hairs, causing the cells to 'fire' – that is, to send out electrical impulses. These impulses are picked up by the nerve fibres in the vicinity and communicated through them to the brain.

The bulge, which appears first near the oval window, travels rapidly along the basilar membrane towards the helicotrema. As it passes, the hair cells in the displaced section fire, and the nerve fibres from that section convey a corresponding signal to the brain.

Let us now consider what happens when we hear a continuous pure tone, causing the eardrum to vibrate with simple harmonic motion. The stirrup footplate is driven alternately into and out of the oval window; we would expect to find a sequence of alternately downward and upward bulges travelling along the basilar membrane. This expectation is indeed borne out. There is, however, a remarkable feature about these bulges, first discovered by the careful and ingenious studies of Georg von Békésy (1960): as they travel away from the oval window they grow in height until they reach a certain position on the basilar membrane, after which they diminish rapidly and disappear.

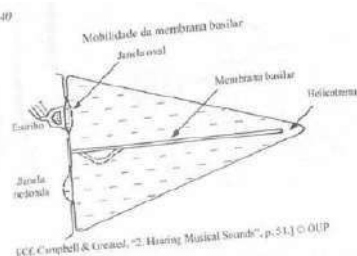
This motion of the basilar membrane is illustrated by the six successive cross-sections sketched in Fig. 2.14, showing how it flexes when a tone of frequency about 1000 Hz is being heard. In sketch (a) a broad upward bulge (indicated by an arrow) can be seen near the oval window end of the

2.3.2. Movimento da membrana basilar

Quando a membrana basilar é flexionada em decorrência da vibração que adentra o ouvido interno, a membrana tectorial desliza por cima dela, flexionando dessa forma os cílios e fazendo as células nervosas se "incendiarem", ou seja, fazendo que as células nervosas emitam impulsos elétricos. Tais impulsos são captados pelas fibras nervosas circunvizinhas e comunicados por essa via ao cérebro.

O Exemplo 40 expõe-nos de forma estilizada uma representação do movimento da membrana basilar.

Exemplo 40

[Cf. Campbell & Greated, "2. Hearing Musical Sounds", p. 51.] © OUP

Georg von Békésy observou em 1960 o que acontece quando escutamos um som puro (senoidal) contínuo, fazendo que o tímpano vibre num movimento harmônico simples: são geradas determinadas saliências que, ao percorrerem a membrana basilar iniciando o trajeto pela janela oval, crescem em dimensão até atingirem um certo ponto culminante, após o qual diminuem e desaparecem rapidamente, como bem ilustra o exemplo seguinte.

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

This is an example of a *place* theory of frequency discrimination, so-called because the brain is assumed to recognise a sound of a particular frequency by the fact that it generates a signal at a particular *place* on the

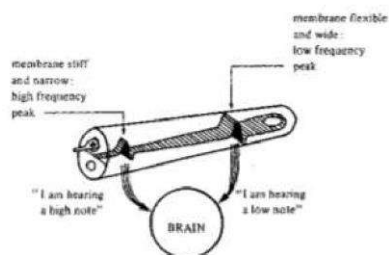



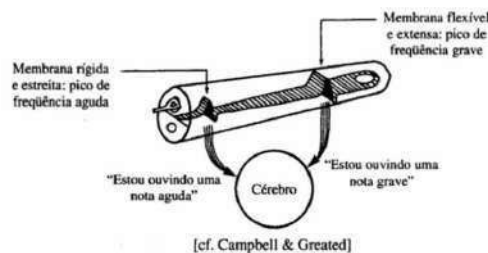
Fig. 2.16. Illustration of a 'place theory', in which frequencies are distinguished by the positions of the corresponding amplitude envelope peaks on the basilar membrane of the inner ear.

54

Hearing musical sounds

basilar membrane. The version of the theory which we have outlined above is an oversimplification, of course: a single pure tone excites hair cells not just under the peak of the amplitude envelope, but over the entire width of the envelope. The first observations of basilar membrane vibrations by Bekesy showed rather broad amplitude envelopes (Fig. 2.17 (a)), and it was difficult to see how this mechanism could account for the

Exemplo 43

Ilustração esquemática da teoria espacial de reconhecibilidade freqüencial

[cf. Campbell & Greated]

Em decorrência dessa constatação, tem-se o que se denomina de *teoria da localização* ou *teoria espacial da discriminação de freqüências*, uma vez que o cérebro assumiria o papel de discriminação das alturas levando em conta sobretudo o lugar particular da membrana basilar no qual o som a flexiona e no qual incide seu pico máximo, gerando a correspondência entre freqüência e dimensão da membrana tal como exposta na página seguinte.

which have been omitted from Fig. 1.15 to simplify the discussion.)

The significance of this point of view will become evident when we take up the detailed study of string vibration in Chapter 6. At this stage we shall simply note that string players use the term 'harmonic' in a way which is not exactly equivalent to our definition, although the two usages are closely related. When a cello player is faced with the notation of Fig. 1.16 (a), he interprets the small circle above the note D, as an instruction to play it as a 'natural harmonic'. He bows the open D string which normally produces a note of pitch D, (Fig. 1.16 (b)), while touching the string lightly at its mid point. This raises the pitch by an octave, and gives a

20

The creation and transmission of musical sounds

characteristically 'thin' quality. We shall see in Chapter 6 that what the player is in fact doing is to damp out with his finger all the odd numbered harmonic components of the string's vibration, including the fundamental. Only the second, fourth and other even numbered harmonics are present in the harmonic spectrum (Fig. 1.17); the ear interprets the corresponding sound as having a pitch an octave higher than that of the open string played normally.

O músico interpreta o pequeno círculo do Exemplo 18a como uma instrução para que toque o "harmônico natural" de oitava da nota D_3, fundamental da segunda corda do violoncelo. Assim sendo, executa a corda D (= Ré) que produz normalmente a nota D_3, mas encosta o dedo ligeiramente na metade da corda, elevando a altura em uma oitava e conferindo ao som uma qualidade "transparente" especial, que logo associa ao 2º harmônico da fundamental (efeito este comum aos instrumentos de corda, incluindo a harpa e o violão). Em geral, o músico acredita estar tocando este harmônico de forma isolada, mas ignora que harmônicos isolados não podem jamais ser gerados sem recursos eletrônicos. O que ele realiza com seu dedilhado, na verdade, é a *eliminação de todos os harmônicos ímpares* do

42 FLO MENEZES

espectro, inclusive a própria fundamental ou 1º harmônico, fazendo soar somente os harmônicos pares 2, 4, 6 etc. O ouvido interpreta isto como uma alteração de oitava, e por vezes como o isolamento de um simples som harmônico na oitava superior, devido ao caráter bem mais sutil da sonoridade resultante (Exemplo 19).

These observations suggest that the brain may not need to rely solely on the place of origin of the signals in order to determine the frequency of a tone. According to the *volley* theory (Wever 1949), the brain combines the signals from a large bundle of nerve fibres; at every peak of the vibration cycle a 'volley' of spikes travels down this bundle. Thus if the brain has an internal clock it can estimate the number of volleys arriving per second, and hence the frequency of the tone.

There are other ways in which the brain could make use of the timing information in the nerve fibre signals. It has been suggested that the time intervals between successive pairs of spikes on a single nerve fibre (inter-spike intervals, or ISIs) may be measured and recorded by the brain (Whitfield 1978; Ohgushi 1983). From an analysis of a sufficient number of ISIs the period of the tone can be deduced. For example, the ISIs in Fig. 2.18 (a) are very nearly 3T, T, 2T and T. This does not prove that the period of the tone being heard is T: it is possible that the period is T/2, or another submultiple of T. But if the period were T/2 we should expect to find ISIs of not only T/2 but also 3T/2, 5T/2, etc. Their absence from the signal in Fig. 2.18 (a) is suspicious; if none appeared after a few more spikes had been recorded, the brain might reasonably conclude that the period was indeed T.

ciclo vibratório.

Tais observações sugerem que o cérebro não faça uso somente da localização dos picos das ondas geradas na membrana basilar para discriminar as alturas, mas combine também os sinais provenientes de um largo feixe de fibras nervosas. Dessa forma, a cada pico do ciclo vibratório uma "torrente" de sinais elétricos viaja por sobre tal feixe. A partir de um "relógio" interior, o cérebro pode, segundo essa teoria, estimar o número de torrentes que chegam por segundo e, por consequência, deduzir a frequência do som.

Fizeram-se outras sugestões concernentes à informação temporal processada no cérebro, como, por exemplo, a de que seria possível ao cérebro medir e recordar os intervalos de tempo entre sucessivos pares de sinais

Exemplo 45

(a)-(e) Impulsos elétricos em 5 fibras nervosas distintas ativadas por um som senoidal cuja vibração é ilustrada em (g); a soma de todos os sinais

Critical bands

Thus far we have been discussing the ability of the ear to distinguish between two pure tones of almost equal frequency when the two tones are heard separately. But what happens when two or more pure tones of different frequency arrive at the ear simultaneously? This is the normal musical experience: we shall see in Chapter 3 that all musical sounds, however complicated, can be considered as combinations of pure tones.

Let us take the case presented in Fig. 2.19 (a). Two tones with frequencies of 523 Hz and 1046 Hz are heard simultaneously; each tone will generate a pattern of vibration on the basilar membrane. The amplitude envelopes for these two vibrations are shown in the diagram (for simplicity, only the upper halves of the envelopes are drawn). The shaded area indicates the overlap of the two envelopes; because the tones are an octave apart, the area of overlap is small. This means that the excitation of the hair cells due to one tone will be almost unaffected by the presence of the other tone.

ing a strong interaction between the two sounds.

When two pure tones are so close in frequency that there is a large

overlap in their amplitude envelopes on the basilar membrane, we say that their frequencies lie within one *critical band*. The concept of the critical band has been of great importance in the development of modern theories of hearing, and critical bandwidths have been defined and measured in a variety of sophisticated ways (Fletcher 1940; Zwicker et al. 1957; Plomp 1976). For our purposes we need only the essential idea: if two tones are separated in frequency by much more than one critical band they fire two largely separate sets of hair cells on the basilar membrane; if the two tones lie well within one critical band they fire almost the same set of hair cells.

The dependence of the critical bandwidth upon frequency is shown by curve (a) in Fig. 2.20. For tones with frequencies below 500 Hz the critical

2.3.5. *Bandas críticas*

Quando dois sons senoidais são bem próximos em frequência, tal proximidade ocasiona uma considerável sobreposição de seus "envelopes dinâmicos" na membrana basilar. A partir de tal sobreposição, dizemos que suas frequências incidem em uma *banda crítica*. Ou seja, se as curvas geradas por dois sons na membrana basilar estão separadas a ponto de não

incidirem em uma banda crítica, tais sons causam sinais elétricos em duas regiões bem diferenciadas de células nervosas; mas se dois sons incidem

Observando o Exemplo 46 (cf. Campbell & Greated), vemos que as áreas pretas indicam uma sobreposição de dois envelopes dinâmicos na membrana basilar. Em 46a, devido ao fato de ambos os sons formarem uma oitava, a área sobreposta é pequena, e isto significa que a excitação das células por um dos sons não será praticamente afetada pela presença do outro som, o qual ocasionará sinais elétricos em uma região bem diferenciada na membrana basilar. Se a separação entre as frequências for reduzida, a situação muda: um número significante de células corresponderá agora a

ambos os sinais, tais como no caso do intervalo de quarta do Exemplo 46b. No Exemplo 46c, com uma ainda maior redução do âmbito do intervalo (trata-se agora de uma segunda maior), os envelopes de amplitude de ambas as notas se sobrepõem quase que por completo, resultando em uma forte interação entre os dois sons.

Como sabemos se duas frequências incidem em uma banda crítica, a

Roughness, beating and the intertone

The interaction of two tones within a critical band takes different forms, depending on the frequency separation. If we start with two tones separated by more than a critical band, and gradually reduce the frequency separation, the first evidence of interaction is a sense of roughness in the sound of the two tones. This roughness becomes more prominent as the frequencies get close, reaching a maximum at a separation of about a quarter of the critical bandwidth (Plomp 1976, p.69).

At this stage, a large number of hair cells in the region of the basilar membrane where the amplitude envelopes overlap will be responding to a signal which is the sum of the two pure tone vibrations. As we saw in

Fig. 2.21. Combination of two pure tones with frequencies 100 Hz and 125 Hz.

2.3.6. Aspereza, batimentos e som intermediário

Se no caso da escuta de sons compostos (ou tônicos) de altura definida, que contenham parciais harmônicos, a ocorrência de bandas críticas dificulta a percepção das notas componentes de um intervalo de pequenas dimensões, a proximidade em frequência de um determinado intervalo (por exemplo, de segunda menor) pode, no caso da escuta de sons senoidais, resultar na escuta de uma única frequência intermediária (como havíamos observado quando falamos de batimentos).

Em se tratando de sons senoidais, portanto, a sensação de aspereza decorrente da banda crítica situa-se em uma zona frequencial diferenciada daquela em que ambas as frequências que compõem o intervalo passam a ser percebidas como uma única frequência. Essa região corresponde à zona em que a diferença entre as frequências é igual a cerca de 16 Hz ou menor, quando então começamos a ouvir batimentos e deduzimos um único som de frequência intermediária com uma modulação de amplitude que corresponde à diferença entre a frequência mais aguda e a mais grave. Se partirmos então de dois sons senoidais bem separados na membrana basilar e reduzirmos gradualmente a frequência de separação entre ambos, a primeira evidência auditiva de ocorrência de banda crítica será uma sensação de *aspereza* no som resultante, confundindo-os, para, em seguida, tal sensação ceder lugar à percepção de um único som intermediário modulado em amplitude por batimentos (CD 26).

This is in strong contrast to the ear's ability to distinguish between two tones which are heard one after the other, rather than together. Curve (c) in Fig. 2.20 shows that below 500 Hz the average listener can tell the difference between two successive tones whose frequencies are only 2 Hz apart; this separation is only one fortieth of the critical bandwidth. Clearly whatever technique is used by the brain to achieve this remarkable sensitivity is incapable of dealing with more than one tone at a time.

Fig. 2.22. Two low pitch pure tones are heard as a single tone of intermediate pitch.

Exemplo 50

Dois sons senoidais soando juntos gerando
a percepção de um único som intermediário

98 Hz
65 Hz
82 Hz
(a) tocado
(b) ouvido

[Cf. Campbell & Greated, "2. Hearing Musical Sounds", p. 61.] © OUP

Esse fenômeno está em evidente contraste com a capacidade em distinguirmos dois sons tocados diacronicamente, um após o outro. Se a percepção tende a confundir dois sons simultâneos que tenham frequências

bem aproximadas, por volta de 500 Hz o ouvinte pode, em média, distinguir dois sons *sucessivos* cujas frequências diferenciam-se apenas por 2 Hz, como ilustra a curva do Exemplo 47c (CD 27).

O Exemplo 51 reexpõe a curva do Exemplo 47a (correspondente à largura de banda crítica da frequência intermediária de um dado intervalo), aqui representada pela curva Δf_{CB}, comparando-a com uma outra curva Δf_D (mais abaixo) que ilustra a *diferença* necessária em frequência para que dois sons senoidais sejam discriminados numa determinada região das alturas.

rough idea of the effective width of the amplitude envelope.

To find whether two tones lie within one critical band, we first find the centre frequency (that is, the frequency mid-way between the two tones). From curve (a) in Fig. 2.20 we obtain the critical bandwidth at the centre frequency; if the frequency separation of the two tones is less than this bandwidth, they lie within a critical band. For example, the two tones in Fig. 2.19 (a) have frequencies of 523 Hz and 1046 Hz: the centre frequency is ½(523+1046) = 784.5 Hz, and the frequency separation is 1046–523 = 523 Hz. This separation is much greater than the critical bandwidth, which at 784.5 Hz is about 150 Hz; the two tones are thus well outside a critical band. For the two tones in Fig. 2.19 (b), the centre frequency is 610 Hz. At this frequency the critical bandwidth is about 130 Hz; the separation of 174 Hz puts the two tones just outside one critical band. On the other hand, the two tones in Fig. 2.19 (c), with a frequency separation of only 65 Hz, are clearly well inside a critical band.

Roughness, beating and the intertone

The interaction of two tones within a critical band takes different forms, depending on the frequency separation. If we start with two tones separated by more than a critical band, and gradually reduce the frequency separation, the first evidence of interaction is a sense of roughness in the sound of the two tones. This roughness becomes more prominent as the frequencies get close, reaching a maximum at a separation of about a quarter of the critical bandwidth (Plomp 1976, p.69).

At this stage, a large number of hair cells in the region of the basilar

Para sabermos se dois sons incidem ou não em uma banda crítica, é preciso antes de mais nada que encontremos a *freqüência intermediária* ou *média* de ambos, resultado da soma das duas freqüências seguida da divisão por 2. Tendo como base a curva do Exemplo 47a, localizamos essa freqüência intermediária no eixo horizontal e obtemos sua projeção correspondente no eixo vertical, verificando a *largura de banda crítica* do intervalo entre as freqüências originais na membrana basilar. Em seguida, calculamos a *separação de freqüência* entre ambas as freqüências, resultante da diferença da freqüência mais aguda pela mais grave. Se a separação de freqüência for menor que a freqüência da largura de banda crítica localizada na curva do Exemplo 47a, ambos os sons incidem em uma banda crítica e são discriminados em freqüência com muito mais dificuldade pelo cérebro.

Ilustremos a seguinte operação a partir de nosso Exemplo 46, descrita por Campbell & Greated e bastante ilustrativa:

1) no Exemplo 46a temos 523 Hz e 1046 Hz. A freqüência intermediária é de 1/2 (523 + 1046) = 784,5 Hz. A freqüência de separação é de 1046 – 523 = 523 Hz. Essa separação é bem maior que a largura de banda crítica da freqüência intermediária 784,5 Hz na curva do Exemplo 47a, que é de cerca de 150 Hz. Conseqüentemente, ambos os sons situam-se bem fora de uma banda crítica;
2) no Exemplo 46b a freqüência intermediária é de 610 Hz, e a largura de banda crítica do intervalo é, conseqüentemente, de cerca de 130 Hz. A separação entre ambas as freqüências (523 Hz e 697 Hz) é de 174 Hz, fazendo que ambos os sons situem-se pouco fora de uma banda crítica;
3) já no Exemplo 46c, com uma separação de apenas 65 Hz, ambos os sons (523 Hz e 588 Hz) incidem nitidamente em uma banda crítica, pois a freqüência intermediária é de 555,5 Hz, cuja largura de banda crítica é de 110 Hz, maior, pois, que a freqüência de separação.

At some point in its journey, the sound signal suffers a curious transformation which has some interesting musical consequences. The signal becomes distorted in such a way that additional components, not present in the external sound wave, are added by the ear. These ear-generated sounds are passed on to the brain along with the original signal. Usually the level of distortion is so low that such additional sounds are not noticeable, but under certain circumstances they can be clearly distinguished as separate pitches. They also exert a more general influence over the way in which we respond to combinations of notes; the distortions generated by major and minor triads, for example, play a significant role in determining the contrasting 'feel' of these chords.

Assim como um som senoidal, puro, não pode ser ouvido em sua integridade absoluta, sofrendo pequenas alterações quer seja da membrana de um alto-falante, quer seja do próprio mecanismo de nosso ouvido, qualquer som que nos atinja sofre, em certa medida, alguma *distorção* em nosso próprio órgão auditivo, sendo adicionado de certos componentes que, em princípio e a rigor, não estavam e não estão presentes na própria onda sonora externa original. Esses elementos sonoros são acrescentados pelo próprio mecanismo de nossa audição, ou seja, pelo ouvido humano. Em

A ACÚSTICA MUSICAL EM PALAVRAS E SONS 87

distorção da forma da onda (principalmente em amplitudes elevadas) em nosso ouvido tem como efeito a introdução de componentes harmônicos na onda resultante que não estavam presentes no sinal original.

Em geral, o nível de distorção do ouvido é tão ínfimo que tais sons adicionais não são consideráveis, mas em determinadas circunstâncias eles poderão ser percebidos como alturas distintas, e, nesses casos, merecem nossa atenção particular.

2.4.1. Sons de combinação

Continuação do mesmo tópico

Roughness, beating and the intertone

The interaction of two tones within a critical band takes different forms, depending on the frequency separation. If we start with two tones separated by more than a critical band, and gradually reduce the frequency separation, the first evidence of interaction is a sense of roughness in the sound of the two tones. This roughness becomes more prominent as the frequencies get close, reaching a maximum at a separation of about a quarter of the critical bandwidth (Plomp 1976, p.69).

At this stage, a large number of hair cells in the region of the basilar membrane where the amplitude envelopes overlap will be responding to a signal which is the sum of the two pure tone vibrations. As we saw in

Chapter 1, two simple harmonic vibrations with a small frequency difference give rise to beats – periodic fluctuations in the amplitude of the combined signal. Fig. 2.21 shows the combined signal due to two pure tones with frequencies of 100 Hz and 125 Hz. These tones are separated by 25 Hz, about a quarter of the critical bandwidth; as Fig. 2.21 shows, the amplitude shows strong beats 25 times every second. This periodic 'tickling' of the basilar membrane seems to be responsible for the feeling of roughness in the sound (Helmholtz 1863, p.255; Terhardt 1974(a)).

As the frequency separation of the tones is further reduced, the beating continues, but the rate of beating slows down. The sensation of roughness diminishes, and the beats are perceived as separate pulses in the sound. By the time this stage is reached, we can no longer identify two separate tones; instead we hear a single tone of intermediate pitch. The amplitude envelopes on the basilar membrane are now overlapping to such an extent that the brain recognises only one peak instead of two.

Curve (b) in Fig. 2.20 shows the frequency separation below which two simultaneous pure tones appear to merge into one. Under 200 Hz the discriminating ability of the ear for simultaneous tones deteriorates rapidly: two pure tones with frequencies 65 Hz and 98 Hz will be heard as a single intertone with a frequency around 82 Hz (Fig. 2.22), although they are separated by a pitch interval of a perfect fifth.

This is in strong contrast to the ear's ability to distinguish between two tones which are heard one after the other, rather than together. Curve (c) in Fig. 2.20 shows that below 500 Hz the average listener can tell the difference between two successive tones whose frequencies are only 2 Hz apart; this separation is only one fortieth of the critical bandwidth. Clearly whatever technique is used by the brain to achieve this remarkable sensitivity is incapable of dealing with more than one tone at a time.

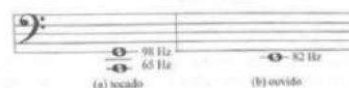
A sensação de aspereza sonora torna-se mais proeminente quando a projeção de banda crítica relativa à frequência intermediária for cerca de quatro vezes maior que a frequência de separação. Nesse ponto, ao mesmo tempo em que um grande número de células em uma mesma região da membrana basilar irá responder aos sinais elétricos de ambos os sons ou àqueles que resultarão da soma das duas vibrações senoidais, a diferença entre ambos os sons começará a ser percebida como batimentos. Ou seja, a maior aspereza se dá na zona limítrofe que separa a percepção do batimento daquela que ainda não o discerne enquanto modulação de amplitude. Com a redução da frequência de separação, a sensação de aspereza diminui até sumir, e os batimentos são percebidos com maior facilidade como pulsos separados do som. Nesse ponto, não somos mais capazes de identificar dois sons porque os envelopes dinâmicos na membrana basilar se sobrepõem de tal maneira que o cérebro reconhecerá apenas um pico máximo a cada período intermediário entre os ciclos dos dois sons originários, ao invés

84 FLO MENEZES

de dois picos separados. Assim sendo, dois sons senoidais de, respectivamente, 65 Hz e 98 Hz serão percebidos como um único som intermediário de cerca de 82 Hz, apesar de estarem separados pelo intervalo de uma quinta perfeita:

Exemplo 50

Dois sons senoidais soando juntos gerando a percepção de um único som intermediário

98 Hz
65 Hz
82 Hz
(a) tocado
(b) ouvido

[Cf. Campbell & Greated, "2. Hearing Musical Sounds", p. 61.] © OUP

Esse fenômeno está em evidente contraste com a capacidade em distinguirmos dois sons tocados diacronicamente, um após o outro. Se a percepção tende a confundir dois sons simultâneos que tenham frequências

A ACÚSTICA MUSICAL EM PALAVRAS E SONS 85

bem aproximadas, por volta de 500 Hz o ouvinte pode, em média, distinguir dois sons *sucessivos* cujas frequências diferenciam-se apenas por 2 Hz, como ilustra a curva do Exemplo 47c (CD 27).

O Exemplo 51 reexpõe a curva do Exemplo 47a (correspondente...

The simple difference tone

The type of distortion which generates aural harmonics would also be expected to generate combination tones. If we hear two pure tones with frequencies f_1 and f_2 (f_2 being higher than f_1), we could anticipate hearing additional tones with frequencies $f_1 + f_2$ (the *sum tone*) and $f_2 - f_1$ (the *simple difference tone*) (Helmholtz 1863, pp.230, 621–623). Whether sum tones can actually be heard remains a matter of some controversy; certainly they are unlikely to be of musical significance. But the simple difference tone is quite a different case: in the right circumstances it is clearly audible (Plomp 1976, pp.28–30), and its musical importance in certain contexts is well established. Indeed, the discovery of the difference tone in the eighteenth century is generally ascribed to the German organist Sorge (1740) and the Italian violinist Tartini (1754).

The simple difference tone is only audible when the original tones are fairly loud, and separated by not much more than a perfect fifth. It is also more obvious if the original tones are high in pitch, since the difference tone can be several octaves below the tones which create it. In their upper register, the flute and the recorder produce sounds close in tone quality to pure tones; duets on these instruments provide good illustrations of difference tones. When the sequence of contracting intervals shown by the open notes in Fig. 2.24 is played by two recorders, the descending arpeggio shown by the black notes can be heard; by consulting the table of pitch and frequency on page 178 the reader can verify that these are the simple

differences tones. If the sequence is repeated an octave higher the difference tones (also transposed up an octave) are even more obvious.

2.4.1.1. O som diferencial simples

Se ouvirmos dois sons senoidais com frequências f_1 e f_2 (supondo-se que f_2 é maior que f_1), há quem afirme que ouviremos um som de combinação com frequência $f_1 + f_2$ (definido como *som da soma*), ao mesmo tempo em que, indubitavelmente, ouviremos um som de combinação com frequência $f_2 - f_1$ (chamado de *som da diferença* ou *som diferencial simples*), como já bem definira, em 1862, Helmholtz. A percepção real dos sons de soma, descobertos pelo próprio Helmholtz, é até hoje objeto de controvérsias entre os cientistas acústicos, e é de toda forma bastante improvável que estes tenham qualquer significado relevante em nossa prática musical. Já o *som diferencial simples*, no entanto, faz-se bem evidente e adquire

importância inelutável, uma vez que demonstra-se claramente audível em diversas circunstâncias de nossa prática musical, seja instrumental, seja eletroacústica. E tal constatação já é de longa data, uma vez que esse fenômeno subjetivo (ou transubjetivo, por ser comum a todos nós) fora relevado no século XVIII pelo violinista, compositor e teórico italiano Giuseppe Tartini, que em 1714 definiu o som diferencial simples como o *terzo suono* ("terceiro som"), derivado dos outros dois que de fato estão sendo emitidos, e, um pouco mais tarde, pelo organista alemão Georg Andreas Sorge (em 1740).

De toda forma, o som diferencial simples será audível apenas se os sons originais forem suficientemente fortes e separados um do outro por não muito mais que um intervalo de quinta. Ele será tanto mais evidente quanto mais os sons originais forem de frequência elevada, uma vez que o som diferencial pode ocorrer várias oitavas abaixo dos sons que o criaram e, no caso de os dois sons que se combinam não se situarem em um registro suficientemente agudo, incidir em uma região abaixo de nosso limite de audibilidade frequencial (portanto abaixo de cerca de 20 Hz).

Exemplo 52

Sons diferenciais simples (notas pretas) gerados por dois sons senoidais

[Cf. Campbell & Greated, "2. Hearing Musical Sounds", p. 65.] © OUP (CD 29)

DISTORTION IN THE EAR

We have seen that the journey of a sound through the ear involves several different stages. The arrival of a sound wave at the outer ear generates pressure fluctuations which make the eardrum flex in and out; this motion causes vibration of the three ossicles in the middle ear, which in turn creates a vibration of the oval window in the cochlea. The resulting oscillation in the fluid filling the cochlea sends a travelling wave along the basilar membrane; the bending of the membrane fires the hair cells which communicate through the auditory nerve with the brain.

At some point in its journey, the sound signal suffers a curious transformation which has some interesting musical consequences. The signal becomes distorted in such a way that additional components, not present in the external sound wave, are added by the ear. These ear-generated sounds are passed on to the brain along with the original signal. Usually the level of distortion is so low that such additional sounds are not noticeable, but under certain circumstances they can be clearly distinguished as separate pitches. They also exert a more general influence over the way in which we respond to combinations of notes; the distortions generated by major and minor triads, for example, play a significant role in determining the contrasting 'feel' of these chords.

teiro) e segunda menor (semitom). Na região de 5 000 Hz, por exemplo, serão necessários cerca de 300 Hz de diferença entre ambos os sons para que se constitua uma segunda menor (fato que se confirma com o semitom entre o Mi bemol 4 978 Hz e Mi natural 5 274 Hz, cuja diferença é de 296 Hz), enquanto que a mesma diferença ocasionará uma terça menor na região de mais ou menos 1 500 Hz (como, por exemplo, entre o Fá# 1 480 Hz e o Lá natural 1 760 Hz, cuja distância é de 280 Hz).

Notamos, contudo, que, em se tratando de sons senoidais, por vezes um intervalo se situa aquém da diferença mínima em freqüência para que ambos os sons sejam percebidos se tocados simultaneamente naquele âmbito específico das alturas (naquele *registro*), como no caso do semitom, o qual só poderá ser ouvido na região que vai de cerca de 500 Hz a 1 000 Hz, onde sua curva coincide com a curva da diferença limítrofe de discriminação do intervalo. Em regiões bem agudas, acima de 4 000 Hz, até mesmo o tom inteiro não será mais percebido. Os demais intervalos implicam já distâncias maiores em ciclos por segundo, de forma que sua audibilidade não fica comprometida já mesmo acima de 100 Hz (CD 28).

2.4. Sons Criados pelo Próprio Ouvido

Toda a trajetória que o som realiza desde sua chegada no ouvido externo até seu entendimento pelo cérebro pode ser resumida pelas seguintes etapas básicas:

1) as ondas sonoras chegam ao ouvido externo, causando flutuações de pressão que fazem o tímpano vibrar;
2) esse fenômeno ocasiona movimentos nos ossículos do ouvido médio, fazendo que a janela oval vibre na entrada do ouvido interno;
3) a vibração resultante no fluido da cóclea gera uma onda que se desloca por sobre a membrana basilar;
4) a oscilação na membrana basilar faz que células de fibras nervosas (cílios) emitam sinais elétricos, transmitindo a informação ao cérebro, que os interpreta.

Assim como um som senoidal, puro, não pode ser ouvido em sua integridade absoluta, sofrendo pequenas alterações quer seja da membrana de um alto-falante, quer seja do próprio mecanismo de nosso ouvido, qualquer som que nos atinja sofre, em certa medida, alguma *distorção* em nosso próprio órgão auditivo, sendo adicionado de certos componentes que, em princípio e a rigor, não estavam e não estão presentes na própria onda sonora externa original. Esses elementos sonoros são acrescentados pelo próprio mecanismo de nossa audição, ou seja, pelo ouvido humano. Em

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

Continuação do tópico

Combination tones

A type of distortion much more important from the musical point of view arises when two or more pure tones are heard simultaneously. If the two tones are separated in frequency by more than a critical band, we do not experience the beating sensation described earlier, since each tone is activating a separate area of the basilar membrane. We may, however, hear some additional tones which disappear if either one of the original tones ceases to sound. These distortion products are called *combination tones*, since they depend for their existence on the combination of two externally generated tones.

The simple difference tone

The type of distortion which generates aural harmonics would also be expected to generate combination tones. If we hear two pure tones with frequencies f_1 and f_2 (f_2 being higher than f_1), we could anticipate hearing additional tones with frequencies $f_1 + f_2$ (the *sum tone*) and $f_2 - f_1$ (the *simple difference tone*) (Helmholtz 1863, pp.230, 621–623). Whether sum tones can actually be heard remains a matter of some controversy; certainly they are unlikely to be of musical significance. But the simple difference tone is quite a different case: in the right circumstances it is clearly audible (Plomp 1976, pp.28–30), and its musical importance in certain contexts is well established. Indeed, the discovery of the difference tone in the eighteenth century is generally ascribed to the German organist Sorge (1740) and the Italian violinist Tartini (1754).

The simple difference tone is only audible when the original tones are fairly loud, and separated by not much more than a perfect fifth. It is also more obvious if the original tones are high in pitch, since the difference tone can be several octaves below the tones which create it. In their upper register, the flute and the recorder produce sounds close in tone quality to pure tones; duets on these instruments provide good illustrations of difference tones. When the sequence of contracting intervals shown by the open notes in Fig. 2.24 is played by two recorders, the descending arpeggio shown by the black notes can be heard; by consulting the table of pitch and frequency on page 178 the reader can verify that these are the simple

Em geral, o nível de distorção do ouvido é tão ínfimo que tais sons adicionais não são consideráveis, mas em determinadas circunstâncias eles poderão ser percebidos como alturas distintas, e, nesses casos, merecem nossa atenção particular.

2.4.1. Sons de combinação

Quando dois ou mais sons senoidais são ouvidos simultaneamente, um importante tipo de distorção no ouvido ocasiona a aparição, na percepção sonora resultante, de sons adicionais àqueles que, de fato, estão ocorrendo. Tais sons "fictícios", ou, melhor, subjetivos, desaparecem se um dos sons originais cessa de ser gerado e, consequentemente, ouvido. Importante e corrente fenômeno na prática musical, tais distorções são designadas, genericamente, por *sons de combinação* – uma vez que são frutos da combinação dos sons existentes e, mais especificamente, da *diferença entre suas frequências* – e dividem-se em *sons diferenciais simples* e *sons diferenciais cúbicos*.

Ainda que Helmholtz tenha afirmado que, sob certas condições, os sons de combinação podem ser medidos objetivamente, não devendo ser somente considerados como fenômeno exclusivamente subjetivo, ele mesmo afirmara que o próprio mecanismo interno do ouvido produziria tais sons diferenciais no ato da escuta de sons puros agudos e fortes. Mesmo que a ocorrência de eventuais distorções na atmosfera, decorrente da interação entre dois sons, possa ser noticiada em circunstâncias específicas e marginais, os sons de combinação são tidos como essencialmente *subjetivos*, decorrentes da percepção humana, ainda que condicionados, obviamente, por dados sonoros objetivos.

2.4.1.1. O som diferencial simples

importância inelutável, uma vez que demonstra-se claramente audível em diversas circunstâncias de nossa prática musical, seja instrumental, seja eletroacústica. E tal constatação já é de longa data, uma vez que esse fenômeno subjetivo (ou transubjetivo, por ser comum a todos nós) fora relevado no século XVIII pelo violinista, compositor e teórico italiano Giuseppe Tartini, que em 1714 definiu o som diferencial simples como o *terzo suono* ("terceiro som"), derivado dos outros dois que de fato estão sendo emitidos, e, um pouco mais tarde, pelo organista alemão Georg Andreas Sorge (em 1740).

Andreas Sorge (em 1740).

De toda forma, o som diferencial simples será audível apenas se os sons originais forem suficientemente fortes e separados um do outro por não muito mais que um intervalo de quinta. Ele será tanto mais evidente quanto mais os sons originais forem de freqüência elevada, uma vez que o som diferencial pode ocorrer várias oitavas abaixo dos sons que o criaram e, no caso de os dois sons que se combinam não se situarem em um registro suficientemente agudo, incidir em uma região abaixo de nosso limite de audibilidade freqüencial (portanto abaixo de cerca de 20 Hz).

Exemplo 52

Sons diferenciais simples (notas pretas) gerados por dois sons senoidais

[Cf. Campbell & Greated, "2. Hearing Musical Sounds", p. 65.] © OUP (CD 29)

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

Fig. 2.24. Simple difference tones (black notes) generated by two pure tones (white notes).

The cubic difference tone

Anyone carrying out the exercise suggested in Fig. 2.24 will be struck by the discovery that the simple difference tones are by no means the only curious sounds to be heard. Indeed, another set of notes, this time a rising phrase (Fig. 2.25), is even more distinctly audible. These notes are *cubic difference tones*. The name is an historical accident, arising from a mistaken idea about the origin of the cubic difference tone. Its frequency is $2f_1 - f_2$, where f_1 is again the lower of the two original frequencies and f_2 the higher.

Fig. 2.25. Cubic difference tones (black notes) generated by two pure tones (white notes).

Comparing Figs 2.24 and 2.25 it can be seen that, while the simple difference tone frequency falls as the interval decreases, the cubic difference tone frequency rises. There is a more significant contrast between the behaviours of the two types of difference tone: while the simple difference tone becomes noticeable only for fairly loud sounds, the cubic difference tone is already audible when the original tones are at a low loudness level (Plomp 1976). Thus in many musical situations the cubic difference tone is the only significant distortion product.

An illustration of the way in which difference tones can affect our perception of music is provided by the excerpt from Sibelius's Symphony

Measurements performed in the 1920s suggested that this kind of distortion was a significant feature of the performance of the ear (Fletcher 1930). For many years it was believed that a loud pure tone generated a

series of *aural harmonics* – harmonics created in the ear – some of which were almost as loud as the original tone. It is now generally accepted that this belief was based on a misunderstanding of the early experiments. More recent measurements (Kuriyawaga and Kameoka 1966; Clack et al. 1972) have shown that, although the ear can introduce these distortion products, they are at such a low level in comparison with the original sound that they are of no musical significance.

2.4.1.2. O som diferencial cúbico

Como pudemos observar, se aproximarmos duas frequências, suas diferenças diminuirão e, consequentemente, ocasionarão a percepção de sons diferenciais simples cada vez mais graves, portanto *descendentes*. Entretanto, um outro tipo de som diferencial será também percebido por nós nas mesmas circunstâncias, os quais, ao invés de serem descendentes, serão *ascendentes*. E isto porque a frequência deste tipo de som diferencial é deduzida subjetivamente como sendo o resultado de $2f_1 - f_2$, em que f_1 é novamente menor que f_2. Ou seja, produzimos em nosso intelecto a sensação de *oitavação* do som mais grave – como que privilegiando um 2º harmônico do espectro de um som tônico cuja fundamental ou 1º harmônico contivesse a frequência da nota mais grave – e efetuamos a diferença entre a frequência desta oitava superior da nota mais grave e a frequência mais aguda. Tais sons são denominados *sons diferenciais cúbicos*, ainda que esta

denominação provenha de algum acaso, e são tão perceptíveis quanto os sons diferenciais simples.

Exemplo 53

Sons diferenciais cúbicos (notas pretas) gerados por dois sons senoidais

[Cf. Campbell & Greated, "2. Hearing Musical Sounds", p. 65.] © OUP (CD 30)

Comparando, pois, ambos os tipos de sons diferenciais, enquanto que a frequência do som diferencial simples cai quando o intervalo entre os sons originais diminui, a do som diferencial cúbico sobe. Por outro lado, enquanto que o som diferencial simples torna-se claramente perceptível apenas no caso de os sons senoidais que lhe dão origem serem suficientemente fortes, o som diferencial cúbico é já audível quando os sons originais são de baixa intensidade. E isto mesmo se a dedução do som diferencial cúbico se revela como um fruto de um "cálculo" bem mais engenhoso por parte de nosso mecanismo perceptivo do que no caso do som diferencial simples. Consequentemente, em muitas passagens da literatura musical, o som diferencial cúbico apresenta-se como a única distorção significativa proveniente da combinação entre os sons existentes.

2.4.2. Harmônicos aurais

Por muitos anos acreditou-se que, independentemente do fato de que dois sons possam ser ouvidos simultaneamente, um único som senoidal de forte intensidade seria já suficiente para que toda uma série de *harmônicos aurais* fosse gerada no ouvido, alguns dos quais de amplitude tão significativa quanto a do som original. Experimentos mais recentes demonstraram, contudo, que, apesar de o ouvido poder introduzir tais distorções, estes "acréscimos" são de um nível de intensidade tão baixo em comparação com o som original que acabam por não adquirir qualquer significado.

We have seen that the inner ear performs a partial frequency analysis of a complex musical tone, sending to the brain a distinct signal recording the presence of each of the first seven or eight harmonic components; in addition the brain receives signals from the part of the basilar membrane activated by the unresolved upper harmonics (Fig. 3.16). In normal musi-

oval window — helicotrema

Combined signal from unresolved upper harmonics

Individual signals from each harmonic giving a distinct amplitude envelope peak

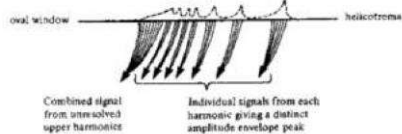



Fig. 3.16. Schematic diagram illustrating the signals sent to the brain when the basilar membrane is vibrating in response to a sound containing many harmonics.

cal listening we do not, however, perceive the lower harmonics separately; we hear only a single tone. This process by which the brain combines a previously analysed set of pure tones into a sound with only one pitch is known as *fusion*.

The pitch of a fused set of harmonics is essentially that of the fundamental (or 1st harmonic) of the series. If we record the sound of the note C_3, with the six harmonic components shown in Fig. 3.17 (a), and replay it through an amplifier with treble and bass controls, we can progressively remove the upper harmonics by turning down the treble control. The pitch of the tone remains constant even when all the harmonics except the first have been filtered out, leaving us with a pure tone of pitch C_3 (Fig. 3.17(b)). (We are ignoring for the moment the subtle effect discussed on p.93.)

A set of pure tones fuse into a single pitch only if they are members of a harmonic series (or a close approximation). If the tones are not harmonically related, each tone is heard separately, and there is no definite feeling of pitch associated with the complete sound. Fletcher (1924) pointed out a unique feature of the harmonic series f, 2f, 3f ...: the frequency difference between adjacent members of the series is constant, and equal to f, the fundamental frequency. He suggested that the 'missing fundamental' in

85

3.2.7. *A percepção da altura fundamental de um som tônico:* fusão, rastreamento de fundamental e modelo harmônico

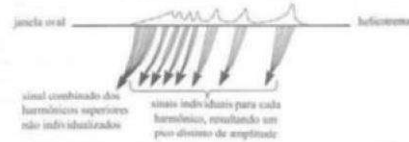
Quando o ouvido interno escuta um som tônico ou composto, ele efetua intuitivamente uma espécie de "análise" das frequências de seus parciais. Em tal processo, como vimos, são enviados ao cérebro sinais distintos relativos aos 7 ou 8 primeiros harmônicos, sendo que os demais conglomeram-se de forma mais densa. O cérebro recebe, no que tange aos harmônicos superiores, sinais das partes da membrana basilar que correspondem ao "montante" dos harmônicos superiores, e não mais a cada harmônico em separado.

Exemplo 63

Diagrama esquemático ilustrando os sinais enviados ao cérebro quando a membrana basilar está vibrando em resposta a um som contendo muitos harmônicos

janela oval — helicotrema

sinal combinado dos harmônicos superiores não individualizados

sinais individuais para cada harmônico, resultando um pico distinto de amplitude

[Cf. Campbell & Greated, "3. Anatomy of a Musical Note", p. 84.] © OUP

Na prática corrente de nossa escuta musical, não percebemos, entretanto, a presença individualizada dos primeiros harmônicos. A importância de que se revestem esses harmônicos iniciais se dá sobretudo no plano da intuição, ainda que eles sejam favorecidos pelas condições fisiológicas de seus envelopes dinâmicos na membrana basilar e que possam, eventualmente,

110 FLO MENEZES

ser efetivamente discriminados por uma escuta mais atenta. Deduzimos de todos os harmônicos, isto sim, a altura determinada de *um* único som, correspondente à frequência de um parcial fundamental. A altura percebida proveniente da percepção dos harmônicos é, pois, essencialmente a da fundamental (1º harmônico) da série harmônica em questão. A tal processo dá-se o nome de *fusão*.

ser efetivamente discriminados por uma escuta mais atenta. Deduzimos de todos os harmônicos, isto sim, a altura determinada de *um* único som, correspondente à frequência de um parcial fundamental. A altura percebida proveniente da percepção dos harmônicos é, pois, essencialmente a da fundamental (1º harmônico) da série harmônica em questão. A tal processo dá-se o nome de *fusão*.

A percepção da altura de uma fundamental resiste ao fato de ela estar ou não, efetivamente, presente no sinal acústico. Se ouvirmos um som contendo, por exemplo, os 6 primeiros harmônicos, deduzimos a frequência de sua fundamental; se suprimirmos os 5 harmônicos acima da fundamental (do 2º ao 6º harmônico), continuamos ouvindo a mesma altura como um som senoidal puro; mas mesmo se suprimirmos apenas a fundamental e continuarmos ouvindo os harmônicos restantes, ainda assim a sensação de frequência permanecerá inalterada. Dessa forma, efetua-se um *rastreamento da fundamental* com relação ao espectro que se faz objeto da escuta. Ou seja, continuaremos a ouvir a *mesma* fundamental, ainda que com ligeira alteração de timbre (com um timbre mais "nasalado", decorrente da supressão da fundamental), mesmo em sua ausência. Diz-se, nesse caso, que a fundamental é *oculta*. É o que nos mostra o Exemplo 64:

Como quer que seja, um aglomerado de sons senoidais somente resulta na percepção de um som de altura definida e inequívoca se estes parciais fizerem parte de uma série harmônica ou se suas proporções forem muito próximas à dos membros de uma série harmônica. Se tais elementos não forem "harmonicamente" correlatos, ou seja, se suas proporções não estiverem calcadas em número inteiro, cada som relativo a cada parcial será ouvido separadamente, perdendo-se a sensação de altura definida associada a esse som composto: nesse caso não se tem *fusão* e se dá então a percepção de uma *mistura* ou, em outros termos, de um *som complexo, inarmônico*.

Arturo Ferres
Tradutor Público Juramentado

Experiments with slightly inharmonic tone complexes

In 1956 de Boer reported the results of some experiments which provided a new insight into the way in which pitch is perceived (de Boer 1956; Plomp 1976, pp.118–120). In one of these experiments, listeners were played a complex tone consisting of five pure tone components with frequencies 600 Hz, 800 Hz, 1000 Hz, 1200 Hz and 1400 Hz. Since this is a harmonic series based on 200 Hz, with the first two components missing, the listeners heard a pitch corresponding to a 200 Hz tone (Fig. 3.19 (a)). They were then asked to compare the pitch of this tone with that of another set of five components, each shifted relative to the corresponding members of the first set by a constant frequency difference. In the example

86

shown in Fig. 3.19 (b), this difference was 80 Hz, so that the second set consisted of pure tones with frequencies 680 Hz, 880 Hz, 1080 Hz, 1280 Hz and 1480 Hz. Although these frequencies were no longer members of an exact harmonic series, the deviation was small enough for the sound still to be heard as a fused tone. The pitch, however, had risen by nearly 200 cents, being matched by a single tone of around 220 Hz.

The significance of this result is twofold. First, it provides another proof that difference tones are not the principal cause of the pitch of a tone complex like Fig. 3.19 (a). If they were, the pitch of the inharmonic complex Fig. 3.19 (b) would not be higher, since the frequency difference between successive members of this set is still 200 Hz. Second, the experiments of de Boer, together with many more recent experiments (de Boer 1976), suggest that the brain determines the pitch of a complex tone by searching for a harmonic pattern among the components separately resolved in the inner ear (Wightman 1973; Goldstein 1973; Terhardt 1974

87

Importantes experimentos foram realizados a partir da década de 1950 (mais precisamente a partir de 1956, pelo físico acústico De Boer, reproduzidos por Campbell & Greated) acerca da percepção das alturas: executando a diversas pessoas um espectro cuja diferença entre os harmônicos adjacentes era de 200 Hz, na ordem 600, 800, 1000, 1200 e 1400 Hz, todas essas pessoas ouviram como fundamental, como era de esperar, o som de 200 Hz. Elevando *aritmeticamente* essas freqüências em 80 Hz – resultando, portanto, na ordem: 680, 880, 1080, 1280 e 1480 Hz, e conservando-se, assim, a diferença de 200 Hz entre os parciais –, os ouvintes continuavam a ouvir o conjunto do espectro como sendo um som de altura definida, muito embora os parciais já não pertencessem a uma série harmônica (na razão de números inteiros), uma vez que nenhuma fundamental poderia gerar esses harmônicos com tal diferença freqüencial entre eles. A sensação relativa à percepção de uma fundamental foi conservada, pois, devido à *regularidade* da diferença em freqüência entre os parciais adjacentes assim como à *proximidade* a um *modelo harmônico*, neste caso o de uma

fundamental de 200 Hz. Em conseqüência da elevação aritmética, por igual, de todas as freqüências dos parciais, a maioria dos ouvintes elevou, porém, o som percebido da fundamental subjetiva para 220 Hz. Ou seja, fez-se

112 FLO MENEZES

220 Hz. Ou seja, fez-se intuitivamente uma espécie de "compromisso" entre a diferença em frequência entre os parciais adjacentes, que remetiam a uma frequência fundamental de 200 Hz, e a elevação aritmética a que se submeteu cada parcial.

If the deviation from a true harmonic series is made much larger than that in Fig. 3.19 (b), the brain gives up the attempt to find a single matching set of harmonics. The components are then heard separately, rather than as a fused tone; several low pitches may also be heard, corresponding to possible (but ambiguous) harmonic matches.

Se, todavia, o desvio for maior que aquele do Exemplo 66b, o cérebro desistirá de procurar relacionar o som percebido com algum modelo harmônico. Nesse caso, os componentes serão ouvidos individualmente e não mais como *fusão* de uma altura determinada. O ouvido deduzirá então, além dos sons individualizados de certos parciais, distintas alturas graves que corresponderiam a possíveis (e ambíguas) fundamentais.

Nessa perspectiva ambígua e multifacetada da percepção harmônica

In one interpretation of the pattern recognition theory of pitch, the brain searches for a distribution of peaks along the basilar membrane corresponding to a harmonic series of vibrations. On this basis, the fact that C_2 and C_3 evoke almost the same sensation can be readily understood.

89

In Fig. 3.22 the motion of the basilar membrane is illustrated schematically for the case in which a complex tone of pitch C_2 is being heard. The first seven harmonics excite separate peaks at positions indicated by horizontal bars; the higher harmonics are separated by less than a critical band, and their excitations merge into a continuously distributed disturbance stretching towards the oval window.

3.2.8. Croma e peso das alturas: sons paradoxais

Segundo uma das possíveis interpretações das teorias de reconhecibilidade da altura (teoria espacial e teoria temporal), o cérebro faria um balanço da distribuição de picos de amplitude ao longo da membrana basilar que correspondessem a uma série harmônica de uma dada fundamental, contrastando o som composto percebido com um modelo harmônico preexistente. Por tal viés, percebe-se com nitidez a inegável identidade entre dois sons que constituam o intervalo de *oitava*.

Exemplo 67

Ilustração das extensões das zonas excitadas na membrana basilar por harmônicos pertencentes a duas séries harmônicas em distância de uma oitava

If the pitch of the tone heard changes from C_2 to C_3, no new parts of the basilar membrane will be excited. The 1st harmonic of C_3 generates a peak at the same position as the 2nd harmonic of C_2; the peak generated by the 2nd harmonic of C_3 is already present as the 4th harmonic of C_2. In other words, the excitation pattern for C_3 is contained *within* the excitation pattern for C_2. The fact that the pitch heard corresponds to C_3 rather than C_2 (or, for that matter, F_1 or C_1) implies that, having found various possible matching harmonic patterns, the brain selects the one with the highest fundamental frequency.

The discussion so far has concentrated on the signal sent to the brain by one ear. Normally, of course, both ears are active, providing information which is synthesised in the brain. That this central synthesis really occurs

90

O que se verifica no Exemplo 67 é que os 7 primeiros harmônicos de uma certa fundamental excitam, como vimos anteriormente, partes separadas da membrana basilar, enquanto que os harmônicos superiores excitam regiões tão próximas na membrana – por estarem contidos na largura de uma banda crítica – que se fundem em direção à janela oval. Assim é que entre, por exemplo, os sons C_2 e C_3 *não é excitada nenhuma nova região da membrana*. Todas as partes excitadas na membrana coincidem no caso do intervalo de oitava, ou seja: o modelo de excitação de C_3 está contido no de C_2. E isso mesmo se considerarmos a reação de ambos os ouvidos: o cérebro sintetiza as informações de ambos, mesmo quando as informações dos dois ouvidos são complementares entre si, e a adição dos sinais, resultando na reconhecibilidade de um modelo harmônico, ocorre, a rigor, no sistema nervoso central.

For an instrument like the recorder, whose sound is close to a pure tone over much of its range, the evidence on which the brain must make its pitch match can be rather thin, and it is particularly easy to misjudge the octave in which the instrument is playing. This is especially the case when other sounds are present (for example, in ensemble playing). Indeed, in the sixteenth and seventeenth centuries it was customary to use a recorder in a group consisting otherwise of stringed instruments, playing the alto line an octave higher than the written part (Morley 1599; Praetorius 1619, p.21). David Munrow explained this practice by noting that to many people the recorder appears to be sounding an octave lower than is actually the case (Munrow 1976, p.53).

No caso de certos instrumentos, como a flauta doce, a qual emite sons muito semelhantes aos sons senoidais por toda sua tessitura, o cérebro possui poucos elementos para deduzir a qualidade espectral do som percebido, podendo facilmente confundir, em face dos outros sons de outros instrumentos, a região efetiva do som fundamental. Tal fato explica o porquê de a flauta doce, nos séculos XVI e XVII, comumente fazer a voz do contralto, oitava acima. Físicos acústicos explicam o feito pelo fato de que a maioria dos ouvintes confunde o registro do instrumento, deduzindo a fundamental das notas emitidas como situando-se uma oitava abaixo do registro onde de fato está. Fenômeno semelhante aplica-se, por vezes, ao assobio, sendo que, nesse caso, várias são as pessoas que tendem a privilegiar a escuta do 3º harmônico (de décima segunda com relação à fundamental), transpondo-o uma ou duas oitavas abaixo, de forma que acabam por assobiar, em geral, uma quarta abaixo da nota real que pretendem emitir. Mas mesmo aí nota-se a força da identidade do intervalo de oitava (aqui pelo prisma da transposição do harmônico privilegiado).

A partir dessa identidade, universalmente reconhecida, do intervalo de

We have seen that our response to a musical sound can be divided into two stages:

(1) a partial frequency analysis of the sound vibration by the ear; and

(2) the interpretation by the brain of the signals sent to it by the ear through the auditory nerve.

The foregoing discussion has emphasised the importance of the second stage. Our ability to follow one part in a complex orchestral score depends to a large extent on the brain's ability to perceive a pattern even when supplied with incomplete evidence. Additional information is provided by the musical context, and by our knowledge of the score – in a sense, we hear what we expect to hear.

A striking illustration of the importance of context and expectation is offered by a recent experiment in which listeners were asked to judge the pitch of a complex tone consisting of a varying number of upper harmonics (Houtgast 1976). When the 5th, 6th and 7th harmonics of G_3 were present, most listeners could hear the pitch of the complex tone as G_3 (Fig. 3.23 (a)); this pitch sensation was still evident when only two harmonics were present (Fig. 3.23 (b)). When some background noise was added, the pitch sensation became much clearer. Indeed, with a noisy background, many listeners could hear the pitch G_3 even when the sound presented to them contained only one upper harmonic (Fig. 3.23 (c)).

At first sight it appears paradoxical that a single pure tone of pitch B_5 can evoke the sensation of a pitch G_3, more than two octaves below. It should

Ainda que nossa resposta a um som possa ser dividida, basicamente, em duas etapas – a primeira, relativa a uma análise parcial das freqüências da vibração sonora pelo ouvido; a segunda, relativa à interpretação pelo cérebro dos sinais enviados pelos ouvidos através dos nervos auditivos –, em grande parte ouvimos o que esperamos escutar. Nossa escuta guia-se, num certo sentido, por um contínuo "monitoramento" decorrente de nossa prática musical ou de nosso hábito auditivo. E nesse sentido o estudo e a prática musicais podem alterar e alteram, de fato, nossas capacidades auditivas.

Uma prova de que o que ouvimos nem sempre corresponde à realidade crua e física dos sinais acústicos são as informações adicionais acrescidas pelo contexto musical e até mesmo pelo nosso conhecimento de uma partitura. Uma fundamental, por exemplo, pode ser deduzida a partir de uma contextualização precedente que facilite sua percepção em um dado contexto sonoro. Nesse sentido, até mesmo um contexto ruidoso e inarmônico

favorecer a dedução de uma fundamental, mesmo em se tratando da escuta de um único harmônico superior que fizesse parte de sua série harmônica (Exemplo 69c), já que os demais estão, de alguma forma, contidos no ruído ambiente e presentes em estado latente na escuta.

A sensação da escuta de uma altura G_1 (nota branca) pode ser facilitada a partir de três (a) ou dois (b) harmônicos superiores; mas até mesmo um único harmônico (c) pode evocar a percepção do G_1 caso tal harmônico esteja em meio a um ruído de fundo, no qual os outros componentes da série harmônica desse G_1 se fazem presentes

Many musical sounds consist of sets of components which are slightly inharmonic. Important examples are the plucked and struck strings (e.g. harp and piano), discussed fully in Chapters 6 and 7. We saw in Fig. 3.19 (b) that the brain determines the pitch of such sounds by finding the best-matching harmonic series. In making this match the brain does not treat all the components present as having equal importance. Several experiments with electronically generated sounds have shown that there is a *dominance region* of frequency, roughly between 500 Hz and 2000 Hz; the pitch of a complex tone is determined principally by the components which lie within this dominance region (Plomp 1967; Ritsma 1967; Bilsen 1973).

E a resposta é positiva. Ao deduzir, a partir de modelos harmônicos, a altura de um som composto, o cérebro não consigna a mesma importância a todos os harmônicos percebidos. Diversos experimentos com sons gerados eletronicamente comprovaram a existência de uma zona privilegiada de frequências, denominada *região dominante*, que se situa mais ou menos de 500 Hz a 2000 Hz, ou seja, num âmbito que vai mais ou menos do C_5 (de 523,25 Hz) ao C_7 (de 2093 Hz). Há quem afirme que essa região privilegiada ocupa o âmbito que vai de 200 Hz a 2000 Hz. Como quer que seja, tal âmbito corresponde a praticamente 2/3 da extensão da membrana basilar, restando para as frequências mais agudas apenas 1/3 da membrana. Esta região comporta-se quase como um *formante* (que, como veremos,

A Acústica Musical em Palavras e Sons 119

The results of these experiments are summarised in Fig. 3.24. For notes in the bass clef, the 4th and 5th harmonics play the most significant role in establishing the pitch of a complex tone. At the top of the treble clef, the 2nd and 3rd harmonics are of greatest importance. Interestingly, it is only for tones at the upper extreme of the musical range (above C_7) that the 1st harmonic is the dominant factor in establishing the pitch.

Some modern 'pitch meters' operate on a complex tone by filtering out the upper frequency components and measuring the frequency of the fundamental. This can produce a misleading result with inharmonic tones. Consider, for example, a measurement of the note C_2 played on a piano.

[Cf. Campbell & Greated, "3. Anatomy of a Musical Note", p. 93. Baseado em Plomp.] © OUP

A partir da região dominante, deduz-se que, para sons da clave de Fá, os 4º e 5º harmônicos adquirem maior relevância. Já para os sons que se situam na clave de Sol, os 2º e 3º harmônicos serão os que assumirão o papel preponderante. Curiosamente, apenas para os sons cujas fundamentais se situarem acima do C, é que a própria fundamental (ou 1º harmônico) assume importância dominante na determinação da altura do som. Ou seja: ainda que a proporção entre harmônicos adjacentes leve o cérebro à dedução de uma frequência fundamental, nem sempre é esta frequência em si o dado mais importante na estabilização da sensação de altura. (Aliás, como vimos, a frequência fundamental pode até mesmo se ausentar sem que a percepção da altura do som seja afetada.)

A percepção de uma determinada altura dependerá, assim, de diversos fatores, e sua estabilidade é decorrente de uma razoável quantidade de infor-

For a complex tone consisting of several harmonics, we would expect this 'mutual repulsion' to shift the lower harmonics downwards and the upper harmonics upwards. Such effects have indeed been demonstrated for sounds with six harmonics, and fundamental frequencies below 400 Hz (Terhardt 1971(b)). The way in which the shifts of individual components affect the overall pitch associated with a complex tone is not yet clear, although it seems plausible that a large retinue of powerful high harmonics could depress the pitch of those lower harmonics which lie in the dominance region. Fortunately, such sounds have a very harsh timbre, and are rarely encountered in conventional musical practice; most sounds produced by orchestral instruments contain little energy above the 10th

harmonic, and for such sounds pitch shifts associated with changes in harmonic spectrum can usually be ignored. They may, however, assume practical significance in electronic and computer-generated music (see Chapter 13).

Pitch discrimination

Mas essa interferência na percepção da altura a partir do confronto das percepções isoladas de sons senoidais pode se dar na própria percepção de um som tônico, e isto apesar de toda a sua pretensa estabilidade, pois parece bem plausível a hipótese, levantada por alguns físicos acústicos, de que um grupo de harmônicos superiores possa "abaixar" a altura percebida de harmônicos mais graves que se situem na região dominante no interior do próprio espectro de um som composto. Porém, mesmo se tal hipótese for confirmada, há que observar que a maioria dos sons produzidos pela música instrumental (orquestral) possui pouca energia acima do 10º harmônico. Para tais sons, os efeitos de alteração da altura a partir de alterações no próprio espectro harmônico são, pois, irrelevantes.

O que dizer, entretanto, da música eletroacústica, com todo seu potencial expansivo na constituição dos espectros? É de supor que, expandindo consideravelmente as possibilidades da música instrumental na constituição dos espectros, a composição eletroacústica possa dar vazão a uma explo-

In Chapter 2 we saw that for frequencies below 500 Hz a frequency difference of around 2 Hz was necessary for two pure tones to be reliably distinguished. Since a fixed pitch interval corresponds to a fixed frequency *ratio*, the pitch interval between 50 Hz and 52 Hz tones (frequency ratio 1.04:1) is much larger than that between 500 Hz and 502 Hz tones (frequency ratio 1.004:1), although both pairs of tones are only just distinguishable to the average ear. Thus although the *frequency* discriminating ability of the ear for pure tones remains roughly constant at low frequencies, *pitch* discrimination deteriorates dramatically at low pitches.

This deterioration is shown in curve (a) of Fig. 3.25, which is the frequency discrimination curve of Fig. 2.20 (c) redrawn in terms of pitch. Maximum sensitivity to small pitch changes is found between C_5 and C_8, where the pitch discrimination threshold is around 6 cents. In other words, if the semitone between C_6 and $C_6^\sharp$ (just above the treble clef) were divided into sixteen equal intervals, each of the seventeen notes spanning this semitone could be distinguished in pitch from its neighbours. In contrast, a tone of pitch C_2 (just below the bass clef) would have to change in pitch by half a semitone before the average ear became aware of any difference.

3.2.10. Discriminação das alturas

Anteriormente havíamos visto que, abaixo de 500 Hz, é necessária uma diferença mínima de 2 Hz para que possamos distinguir dois sons senoidais

justapostos. Na medida em que um intervalo musical fixo em altura corresponde a uma razão matemática fixa de freqüência, essa diferença de 2 Hz corresponderá a distintos intervalos musicais, conforme a região em que se situarem os sons. O intervalo em altura (intervalo musical) entre, por exemplo, 52 Hz e 50 Hz (na razão de *1,04*) é muito maior que o intervalo entre 500 Hz e 498 Hz (na razão de *1,00402*), ainda que ambos os desvios em altura sejam, em média, discerníveis na mesma medida pelo ouvido.

Entretanto, quanto mais graves forem os sons senoidais confrontados, menor será nossa capacidade de distinção intervalar. Essa diferença de 2 Hz a partir do B_4 (de 493,88 Hz), plenamente perceptível para o ouvido, corresponde a um desvio de somente 7 cents (até um "B_4 mais alto" de 495,88 Hz), ou seja, a cerca de 1/29 de tom. Mas numa região bem grave, a mesma diferença pode significar um semitom, como entre A_0 (de 27,50 Hz) e $B_0^\flat$ (de 29,13 Hz). Enquanto que na região do B_4 temos a capacidade de distinguir 1/29 de tom, na região de A_0 mal chegamos a distinguir uma segunda menor! Assim sendo, embora a habilidade do ouvido na discriminação de freqüências para sons puros permaneça, *grosso modo*, constante em regiões graves, a discriminação da altura (do intervalo) deteriora-se drasticamente em relação aos sons graves.

The reason for this apparent discrepancy becomes clear when we recall that the pitch of a complex musical tone is determined, not by the fundamental component, but by those harmonics which lie in the 'dominance region'. When the contrabassoon plays the note C_1, it generates a sound rich in upper harmonics (Fig. 3.27); many of these harmonics lie in the region above C_5, where pitch sensitivity is greatest. Although a deviation of 20 cents would pass unnoticed in the fundamental, the same change in the eighth harmonic (C_4) would be easily detected, and the brain would be alerted to the change of pitch. For this reason, the pitch discrimination threshold for a sound rich in upper harmonics remains at around 10 cents down to the lowest musically significant pitch (Walliser 1969(c)).

A rigor, tais passagens não são prejudicadas pelo fato de a percepção das alturas desses sons graves estar muito mais condicionada aos harmônicos da região dominante do que à percepção dos harmônicos fundamentais propriamente ditos. Ao executar um C_1, por exemplo, um contrafagote produz, na verdade, diversos harmônicos acima do C_5, região em que a sensibilidade para a altura é bem pronunciada. O ouvido apoia-se na percepção de todos os componentes espectrais, não só das fundamentais, de forma que a discriminação melódica torna-se, em grande parte, viável, mesmo em regiões graves. Fenômenos ligados a uma maior taxa de ressonância dos sons graves (o que faz que os sons se "embaralhem") e às variações da quantidade de elementos senoidais conforme o timbre dos instrumentos fazem com que figurações rápidas, em regiões graves, sejam, contudo, de um modo geral prejudicadas, se comparadas a figuras com as mesmas características articulatórias realizadas em regiões médias e agudas das frequências.

Fig. 3.27. Average spectrum envelope for a contrabassoon playing the note C_1.

Absolute pitch

One of the most fascinating aspects of pitch perception is the ability, possessed by a small minority of musicians, to generate or identify a specified pitch without access to a reference pitch. This ability is commonly described as 'perfect pitch', although the more meaningful term *absolute pitch* has come to be used by scientists studying the phenomenon.

In the light of our understanding of the behaviour of the inner ear, it is possible to speculate on how absolute pitch judgements might be made. A

In the light of our understanding of the behaviour of the inner ear, it is possible to speculate on how absolute pitch judgements might be made. A pure tone of frequency 440 Hz generates a maximum response at a particular place on the basilar membrane, and a bundle of nerve fibres from this place carries a signal to the brain. If the listener has learned at some stage to identify the stimulation of this bundle of nerve fibres with the name 'A_4' (or, indeed, any other name), then whenever the bundle is stimulated in the future the brain will respond with the corresponding name.

The great majority of musicians possess only *relative pitch*: that is, the ability to generate or identify any pitch when supplied with a standard pitch as reference. Relative pitch is essentially interval recognition; given a standard A_4 from a tuning fork, the trained musician can recognise $C^{\#}_6$ as an octave plus a major third higher (whether or not such interval labels are consciously used). But after a time, or some distraction, the standard pitch is forgotten, and the ability to name pitches accurately disappears.

innately. However, in 1970 Paul Brady proved that it was possible to develop absolute pitch to a high degree by submitting himself to a learning programme using computer-generated tones (Brady 1970); subsequent tests showed that his pitch recognition was as accurate as that of natural possessors of absolute pitch (Carroll 1975). It has been suggested that the memory of a pitch standard is imprinted in natural possessors of absolute pitch in early childhood, and can only be learned subsequently with great difficulty (Copp 1916).

3.2.11. Altura e ouvido absoluto

Um dos mais intrigantes fenômenos acústicos é a capacidade, por parte de uma ínfima minoria de pessoas (e de músicos), de emitir alturas determinadas sem qualquer prévia referência acústica. Denomina-se esta altura de "altura perfeita" ou, como preferem os acústicos, de *altura absoluta*. Por analogia, falamos de um *ouvido absoluto* em relação à percepção das alturas por parte dessas pessoas.

O ouvido absoluto se dá por uma presumível capacidade de *fixação* na memória do lugar em que se dão os picos de amplitude das curvas dinâmicas das frequências na membrana basilar (de acordo com a teoria da localização das frequências). Se falamos inicialmente de uma *fixação* e não de uma memorização, é porque, em geral, a pessoa que tem ouvido absoluto apresenta grandes dificuldades de se desvencilhar de seus "modelos frequenciais", pelos quais intuitivamente mede e localiza as alturas, e situações nas quais as afinações necessitam de ser ligeiramente ajustadas lhe provocam grande embaraço. Por tal razão, nem sempre possuir ouvido absoluto traduz-se em vantagem para o músico. A grande maioria dos (bons) músicos possui, na verdade, apenas e tão somente o *ouvido relativo*, que

constitui essencialmente o poder de reconhecimento dos intervalos e o qual demonstra-se, na prática, mais importante e útil que o ouvido absoluto.

Em 1970, Paul Brady provou que é possível adquirir "ouvido absoluto" através de treino assistido por programas de computador especializados e baseados na emissão de sons gerados pelo computador. Nesse caso, podemos falar de "memorização", sem a fixidez à qual se atém, mesmo sem desejá-lo, o músico dotado de ouvido absoluto. Admitiu-se que a memória das alturas absolutas nas pessoas de ouvido absoluto se deu na primeira infância, e que tal faculdade de fixação na memória só pode ser adquirida, posteriormente, com grande esforço.

The chorus effect

In Chapter 1 it was pointed out that the timbre of a section of ten violins playing in unison is quite different from that of a solo violin. The primary reason for this difference, which is known as the *chorus effect*, is the fact that each of the ten instruments is an independent sound source; no two instruments will have exactly the same repetition frequency. There will thus be a constantly changing phase relationship between any given harmonic component produced by one instrument and the same component produced by each of the other members of the section. When only two instruments are playing in unison, a high degree of playing control is necessary in order to avoid an unpleasant beating sensation due to these phase differences; if each instrument uses a slightly different vibrato rate, the regularity of the beat pattern is broken up, and the effect is less

prominent. With a section of ten instruments, the wide variety of different beating rates produces a 'shimmer' which is an important aspect of the chorus effect.

From the point of view of the frequency spectrum, the sound generated by a section of instruments, or a chorus of voices, does not correspond to a series of lines at harmonic frequencies, but rather to a series of peaks centred on the appropriate harmonics. A good orchestral string section, or a well-drilled choir, normally generates a sound with frequency peaks corresponding to a pitch spread of under 20 cents. On the other hand, one professional choir is reported as having a pitch spread of almost a full semitone on the lower notes (Meyer 1978, p.28). This is presumably due to the use of wide vibrato by the individual choir members, rather than to poor intonation; in any case, the generous brain interprets the sound as a musical tone with a definite, stable pitch and a rich choral timbre.

3.5.14. O chorus effect

Por fim, faz-se necessário citarmos aqui novamente o *chorus effect*, outra alteração substancial do timbre na prática musical. Este efeito consiste na constante alteração das relações de fase de um determinado componente harmônico produzido simultaneamente por instrumentos afins em uma mesma seção musical. (Cf. o exemplo sonoro em CD 14.)

Quando apenas dois instrumentos estão tocando em uníssono, um alto nível de controle é necessário para que se evite a sensação por vezes desprazível de batimento decorrente da alteração da relação de fase entre ambos. Se ambos utilizam vibratos ligeiramente distintos, este risco é menos proeminente. Como quer que seja, o *chorus effect* torna o contexto complexo a ponto de enriquecer substancialmente a relação de fase entre sons de um mesmo naipe orquestral ou de uma mesma família instrumental. Este efeito é perceptível quando da comparação de uma mesma obra para instrumentos de cordas solistas com sua versão para orquestra de cordas. A versão orquestral "ganha corpo" frente à versão mais "cristalina" para solistas.

No mais, o *chorus effect* é comumente utilizado como um dos procedimentos eletroacústicos de adensamento da textura sonora mediante a drástica alteração da relação de fase entre o som original e suas reflexões simuladas por computador.

If the pitch of the tone heard changes from C_2 to C_3, no new parts of the basilar membrane will be excited. The 1st harmonic of C_3 generates a peak at the same position as the 2nd harmonic of C_2; the peak generated by the 2nd harmonic of C_3 is already present as the 4th harmonic of C_2. In other words, the excitation pattern for C_3 is contained *within* the excitation pattern for C_2. The fact that the pitch heard corresponds to C_3 rather than C_2 (or, for that matter, F_1 or C_1) implies that, having found various possible matching harmonic patterns, the brain selects the one with the highest fundamental frequency.

The discussion so far has concentrated on the signal sent to the brain by one ear. Normally, of course, both ears are active, providing information which is synthesised in the brain. That this central synthesis really occurs

O que se verifica no Exemplo 67 é que os 7 primeiros harmônicos de uma certa fundamental excitam, como vimos anteriormente, partes separadas da membrana basilar, enquanto que os harmônicos superiores excitam regiões tão próximas na membrana – por estarem contidos na largura de uma banda crítica – que se fundem em direção à janela oval. Assim é que entre, por exemplo, os sons C_3 e C_4 *não é excitada nenhuma nova região da membrana*. Todas as partes excitadas na membrana coincidem no caso do intervalo de oitava, ou seja: o modelo de excitação de C_4 está contido no de C_3. E isso mesmo se considerarmos a reação de ambos os ouvidos: o cérebro sintetiza as informações de ambos, mesmo quando as informações dos dois ouvidos são complementares entre si, e a adição dos sinais, resultando na reconhecibilidade de um modelo harmônico, ocorre, a rigor, no sistema nervoso central.

For a complex tone consisting of several harmonics, we would expect this 'mutual repulsion' to shift the lower harmonics downwards and the upper harmonics upwards. Such effects have indeed been demonstrated for sounds with six harmonics, and fundamental frequencies below 400 Hz (Terhardt 1971(b)). The way in which the shifts of individual components affect the overall pitch associated with a complex tone is not yet clear, although it seems plausible that a large retinue of powerful high harmonics could depress the pitch of those lower harmonics which lie in the dominance region. Fortunately, such sounds have a very harsh timbre, and are rarely encountered in conventional musical practice; most sounds produced by orchestral instruments contain little energy above the 10th

harmonic, and for such sounds pitch shifts associated with changes in harmonic spectrum can usually be ignored. They may, however, assume practical significance in electronic and computer-generated music (see Chapter 13).

Mas essa interferência na percepção da altura a partir do confronto das percepções isoladas de sons senoidais pode se dar na própria percepção de um som tônico, e isto apesar de toda a sua pretensa estabilidade, pois parece bem plausível a hipótese, levantada por alguns físicos acústicos, de que um grupo de harmônicos superiores possa "abaixar" a altura percebida de harmônicos mais graves que se situem na região dominante no interior do próprio espectro de um som composto. Porém, mesmo se tal hipótese for confirmada, há que observar que a maioria dos sons produzidos pela música instrumental (orquestral) possui pouca energia acima do 10º harmônico. Para tais sons, os efeitos de alteração da altura a partir de alterações no próprio espectro harmônico são, pois, irrelevantes.

O que dizer, entretanto, da música eletroacústica, com todo seu potencial expansivo na constituição dos espectros? É de supor que, expandindo consideravelmente as possibilidades da música instrumental na constituição dos espectros, a composição eletroacústica possa dar vazão a uma exploração de tais fenômenos, os quais podem eventualmente assumir proporções consideráveis na composição como um todo e, mais especificamente, na composição do próprio timbre.

In Chapter 2 we saw that for frequencies below 500 Hz a frequency difference of around 2 Hz was necessary for two pure tones to be reliably distinguished. Since a fixed pitch interval corresponds to a fixed frequency *ratio*, the pitch interval between 50 Hz and 52 Hz tones (frequency ratio 1.04:1) is much larger than that between 500 Hz and 502 Hz tones (frequency ratio 1.004:1), although both pairs of tones are only just distinguishable to the average ear. Thus although the *frequency* discriminating ability of the ear for pure tones remains roughly constant at low frequencies, *pitch* discrimination deteriorates dramatically at low pitches.

3.2.10. Discriminação das alturas

Anteriormente havíamos visto que, abaixo de 500 Hz, é necessária uma diferença mínima de 2 Hz para que possamos distinguir dois sons senoidais

justapostos. Na medida em que um intervalo musical fixo em altura corresponde a uma razão matemática fixa de freqüência, essa diferença de 2 Hz corresponderá a distintos intervalos musicais, conforme a região em que se situarem os sons. O intervalo em altura (intervalo musical) entre, por exemplo, 52 Hz e 50 Hz (na razão de *1,04*) é muito maior que o intervalo entre 500 Hz e 498 Hz (na razão de *1,00402*), ainda que ambos os desvios em altura sejam, em média, discerníveis na mesma medida pelo ouvido.